

# ФИЗИКА

конспекты, схемы, таблицы

практикум по решению задач

ПОЛНЫЙ  
ШКОЛЬНЫЙ  
КУРС

лабораторные и практические работы

самостоятельные и контрольные работы  
творческие задания

УНИВЕРСАЛЬНОЕ УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

УДК 53  
ББК 22.3я721  
Ф 50

Издание подготовлено ведущими специалистами Института общего среднего образования  
Российской академии образования

Авторский коллектив:

профессор, кандидат педагогических наук *В. А. Орлов* (раздел «Механика»)

кандидат педагогических наук *Г. Г. Никифоров* (раздел «Механика»)

кандидат педагогических наук *А. А. Фадеева* (раздел «Молекулярная физика. Термодинамика», «Геометрическая оптика»)

кандидат химических наук *Н. К. Ханнанов* (раздел «Электростатика и постоянный ток»)

профессор, доктор педагогических наук *Ю. А. Сауров* (раздел «Электромагнитные колебания и волны. Оптика»)

доктор педагогических наук, кандидат физико-математических наук *О. Ф. Кабардин* (раздел «Физика атома и атомного ядра»)

Физика: Школьный курс. — М.: АСТ-ПРЕСС, 2000. — 688 с.: ил. —  
Ф 50 («Универсальное учебное пособие»).

ISBN 5-7805-0538-1

Это учебное пособие универсально как по структуре, так и по назначению.

Краткое изложение каждой темы завершается обучающими и информационными таблицами, позволяющими обобщить и систематизировать полученные по теме знания. Лабораторные, самостоятельные, практические работы — это обучающий процесс и проверка знаний на практике. Контрольная работа осуществляет тематический обобщающий контроль. Творческие задания позволяют учесть индивидуальность каждого ученика, развивают познавательную активность школьника.

Все теоретические понятия подкреплены практическими заданиями. Четкая последовательность видов учебной деятельности при изучении каждой темы помогает любому ученику освоить материал, развивает умение самостоятельно приобретать и применять знания, учит наблюдать, объяснять, сопоставлять, экспериментировать.

Работать с универсальным учебным пособием с одинаковым успехом могут и школьники, и учителя.

Ф 4306021200-003  
8П9(03)-2000

УДК 53  
ББК 22.3я721

ISBN 5-7805-0538-1

© «АСТ-ПРЕСС», 2000

# Содержание

Предисловие .....	23
-------------------	----

## Механика

<b>Механические явления и методы их исследований</b>	<b>1. Механические явления, величины, закономерности .....</b>	<b>26</b>
	<i>Конспект, таблицы, схемы .....</i>	<i>28</i>
	Движение тел .....	28
	Взаимодействие тел: силы и энергия взаимодействия .....	28
	Энергия взаимодействия .....	30
	<i>Экспериментальные исследования .....</i>	<i>31</i>
	Исследование силы трения .....	31
	Исследование силы упругости .....	32
	<i>Самостоятельная работа .....</i>	<i>33</i>
	<i>Контрольная работа .....</i>	<i>35</i>
	<b>2. Методы физических исследований .....</b>	<b>37</b>
	<i>Конспект, таблицы, схемы .....</i>	<i>37</i>
	Научный метод Галилея .....	37
	<i>Экспериментальные исследования .....</i>	<i>39</i>
	Свободное падение .....	39
	<b>3. Измерение – основа эксперимента .....</b>	<b>41</b>
	<i>Конспект, таблицы, схемы .....</i>	<i>41</i>
	Виды и методы физических измерений. Причины погрешностей. Измерение времени и расстояний .....	46
	Прямые однократные измерения. Косвенные измерения .....	52
	Случайные погрешности .....	54
	<i>Самостоятельная работа .....</i>	<i>56</i>

## Кинематика

<i>Контрольная работа</i> .....	57
<i>Теоретические задания</i> .....	58
Тормозной путь автомобиля .....	58
<b>1. Основные понятия кинематики</b> .....	<b>59</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	59
Система отсчета .....	59
Траектория, путь, перемещение, координатные уравнения движения .....	61
<i>Лабораторные работы</i> .....	63
Исследование движения тела с использованием стробоскопической фотографии .....	63
<i>Практикум по решению задач</i> .....	64
Примеры решения типовых задач .....	64
Решить самостоятельно .....	65
<i>Контрольные работы</i> .....	66
Основные понятия кинематики .....	66
Контрольная работа повышенного уровня сложности .....	67
<b>2. Относительность движения</b> .....	<b>68</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	68
Связь перемещения одной и той же материальной точки в разных системах отсчета .....	70
Теорема сложения скоростей .....	70
<i>Практикум по решению задач</i> .....	71
Примеры решения задач .....	71
Решить самостоятельно .....	72
<i>Контрольные работы</i> .....	73
Контрольная работа повышенного уровня сложности .....	75
<b>3. Равномерное прямолинейное движение</b> .....	<b>77</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	77
<i>Практикум по решению задач</i> .....	78
Примеры решения задач .....	78
Решить самостоятельно .....	79
<i>Контрольные работы</i> .....	79
Контрольная работа повышенного уровня сложности .....	82
<b>4. Равноускоренное движение</b> .....	<b>83</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	83
Зависимость проекции скорости от времени для прямолинейного равноускоренного движения .....	84
Зависимость координаты от времени для прямолинейного равноускоренного движения .....	84
<i>Творческие задания</i> .....	85
Признаки равноускоренного прямолинейного движения .....	85
<i>Лабораторные работы</i> .....	86
Исследование равноускоренного движения .....	86

<i>Практикум по решению задач</i> .....	87
Примеры решения задач .....	87
Решить самостоятельно .....	89
<i>Контрольные работы</i> .....	91
Контрольная работа повышенного уровня сложности .....	92
<b>5. Свободное падение тел</b> .....	<b>93</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	93
Прямолинейное свободное падение .....	94
Движение тела, брошенного горизонтально .....	94
Движение тела, брошенного под углом к горизонту .....	95
<i>Экспериментальные исследования</i> .....	95
<i>Творческие задания</i> .....	96
<i>Практикум по решению задач</i> .....	96
Примеры решения задач .....	96
Решить самостоятельно .....	97
<i>Контрольные работы</i> .....	98
Контрольная работа повышенного уровня сложности .....	99
<b>6. Кинематика движения по окружности</b> .....	<b>100</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	100
Движение по окружности со скоростью, постоянной по модулю .....	100
Обобщающая схема .....	101
<i>Лабораторные работы</i> .....	102
Изучение равномерного движения точки по окружности .....	102
<i>Практикум по решению задач</i> .....	102
Примеры решения задач .....	102
Решить самостоятельно .....	104
<i>Контрольные работы</i> .....	105
Контрольная работа повышенного уровня сложности .....	106
<i>Творческие задания</i> .....	107
<b>1. Введение</b> .....	<b>108</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	108
Классическая механика — что это такое? .....	108
<b>2. Взаимодействие тел. Сила. Масса. Сложение сил.</b>	
<b>Первый закон Ньютона</b> .....	<b>111</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	111
Первый закон Ньютона .....	112
<i>Практикум по решению задач</i> .....	113
Примеры решения задач .....	113
Решить самостоятельно .....	113
<i>Контрольные работы</i> .....	114
<b>3. Второй закон Ньютона</b> .....	<b>116</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	116
<i>Экспериментальные исследования</i> .....	119

Экспериментальное задание: динамическое измерение силы .....	119
<i>Практикум по решению задач</i> .....	120
Примеры решения задач .....	120
Решить самостоятельно .....	121
<i>Контрольные работы</i> .....	122
Контрольная работа повышенного уровня сложности .....	123
<b>4. Третий закон Ньютона. Система законов динамики .....</b>	<b>124</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	124
Принцип относительности Г. Галилея .....	125
<i>Лабораторные работы</i> .....	126
Изучение взаимодействия тел .....	126
<i>Практикум по решению задач</i> .....	127
Примеры решения задач .....	127
Решить самостоятельно .....	127
<b>5. Силы в механике: сила всемирного тяготения .....</b>	<b>129</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	129
Три основные силы в механике .....	129
Закон всемирного тяготения .....	129
Сила тяжести .....	131
<i>Практикум по решению задач</i> .....	131
Решить самостоятельно .....	135
<i>Контрольные работы</i> .....	135
Контрольная работа повышенного уровня сложности .....	137
<i>Творческие задания</i> .....	137
<b>6. Силы в механике: сила упругости, закон Гука, вес тела .....</b>	<b>138</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	138
Типы деформаций .....	138
Закон Гука .....	139
Вес тела .....	139
<i>Лабораторные работы</i> .....	141
<i>Практикум по решению задач</i> .....	141
Примеры решения задач .....	141
Решить самостоятельно .....	143
<i>Контрольные работы</i> .....	144
Контрольная работа повышенного уровня сложности .....	145
<b>7. Силы трения. Обобщение: силы в механике .....</b>	<b>148</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	148
Что такое силы трения .....	148
Силы трения покоя и скольжения .....	149
Жидкое трение .....	149
<i>Практикум по решению задач</i> .....	149
Примеры решения задач .....	149
Решить самостоятельно .....	153

<i>Контрольные работы</i> .....	153
Контрольная работа повышенного уровня сложности .....	155
<i>Творческие задания</i> .....	153
<b>8. Условие равновесия твердого тела</b> .....	<b>156</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	156
Проекция силы, момент силы относительно оси .....	156
Простые случаи условий равновесия .....	158
Виды равновесия .....	158
Принцип минимума потенциальной энергии .....	158
Равновесие твердого тела, погруженного в жидкость .....	158
<i>Лабораторные работы</i> .....	159
<i>Практикум по решению задач</i> .....	159
Примеры решения задач .....	159
Решить самостоятельно .....	162
<i>Контрольные работы</i> .....	163
Контрольная работа повышенного уровня сложности .....	164
<i>Творческие задания</i> .....	165
<b>1. Введение</b> .....	<b>166</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	166
Сохраняющиеся величины в физике .....	166
<b>2. Импульс тела. Импульс силы</b> .....	<b>168</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	168
Сила — скорость изменения импульса тела .....	168
<i>Лабораторные работы</i> .....	168
Сравнение силы тяжести со скоростью изменения импульса свободно падающего тела .....	168
Измерение импульса тела по его тормозному пути .....	169
<i>Практикум по решению задач</i> .....	169
Примеры решения задач .....	169
Решить самостоятельно .....	169
<i>Контрольные работы</i> .....	170
<b>3. Закон сохранения импульса</b> .....	<b>172</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	172
<i>Лабораторные работы</i> .....	174
<i>Практикум по решению задач</i> .....	175
Примеры решения задач .....	175
Решить самостоятельно .....	177
<i>Контрольные работы</i> .....	177
Контрольная работа повышенного уровня сложности .....	179
<b>4. Работа, мощность, механическая энергия</b> .....	<b>180</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	180
Основные физические величины .....	180
Работа переменной силы .....	180

Потенциальная энергия .....	182
Кинетическая энергия тела .....	184
Графики зависимостей .....	185
<i>Лабораторные работы</i> .....	185
Оценка собственной мощности .....	185
<i>Практикум по решению задач</i> .....	187
Примеры решения задач: механическая работа и мощность .....	187
Примеры решения задач: кинетическая и потенциальная энергия .....	188
Задачи для самостоятельного решения: механическая работа и мощность .....	191
Задачи для самостоятельного решения: кинетическая и потенциальная энергия .....	191
<i>Контрольные работы</i> .....	191
Контрольная работа повышенного уровня сложности .....	193
<b>5. Закон сохранения механической энергии .....</b>	<b>194</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	194
Полная механическая энергия и ее изменение .....	194
Закон сохранения механической энергии .....	195
Условия применимости закона сохранения механической энергии .....	195
Удар .....	195
Движение жидкостей и газов .....	196
Схема: «Закон сохранения энергии в механике» .....	197
<i>Лабораторные работы</i> .....	198
Исследование преобразования энергии при свободном падении .....	198
<i>Практикум по решению задач</i> .....	198
Примеры решения задач: закон сохранения механической энергии .....	198
Примеры решения задач: кинетическая и потенциальная энергия .....	199
Примеры решения задач: упругий и неупругий удары .....	201
Задачи для самостоятельного решения: закон сохранения энергии .....	204
Задачи для самостоятельного решения: упругий и неупругий удар .....	205
<i>Контрольные работы</i> .....	205
Контрольная работа повышенного уровня сложности .....	208
<i>Творческие задания</i> .....	209
<b>1. Введение .....</b>	<b>210</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	210
Затухающие колебания .....	213
<b>2. Гармонические колебания .....</b>	<b>214</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	214

Геометрическая модель гармонических колебаний .....	214
Условия возникновения гармонических колебаний .....	215
Гармонические колебания — это очень важная модель, позволяющая изучать колебания громадного числа физических систем .....	216
Упругие колебания .....	216
Ускорение гармонических колебаний .....	217
Скорость при гармонических колебаниях .....	218
Полная механическая энергия гармонически колеблющегося тела .....	218
Графики, иллюстрирующие гармонические колебания .....	218
<i>Практикум по решению задач</i> .....	221
Примеры решения задач .....	221
Решить самостоятельно .....	222
<i>Контрольные работы</i> .....	223
Контрольная работа повышенного уровня сложности .....	226
<b>3. Свободные колебания</b> .....	<b>227</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	227
Условия возникновения свободных колебаний .....	227
Затухание свободных колебаний .....	227
Гармонические колебания — идеальная модель свободных колебаний .....	227
<i>Лабораторные работы</i> .....	228
Изучение свободных колебаний .....	228
<i>Экспериментальные задания</i> .....	229
<i>Практикум по решению задач</i> .....	230
Примеры решения задач: пружинный маятник .....	230
Примеры решения задач: математический маятник .....	231
Решить самостоятельно .....	231
<i>Контрольные работы</i> .....	232
Контрольная работа повышенного уровня сложности .....	234
<b>4. Автоколебания. Вынужденные колебания. Резонанс</b> .....	<b>235</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	235
Автоколебания .....	235
Вынужденные колебания .....	235
Результаты экспериментального исследования установившихся колебаний .....	236
Два способа объяснения свойств вынужденных колебаний .....	236
Резонанс .....	238
<i>Лабораторные работы</i> .....	238
Сборка электромеханического автоколебательного генератора незатухающих колебаний .....	238
<i>Практикум по решению задач</i> .....	239
Примеры решения задач .....	239
Решить самостоятельно .....	240
<i>Контрольные работы</i> .....	240

<b>5. Механические и звуковые волны</b> .....	<b>242</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	242
Механические волны .....	242
Гармонические волны .....	243
Длина волны .....	243
Дисперсия гармонических волн .....	246
Интерференция волн .....	247
Звуковые волны .....	248
Частотная классификация звуковых волн .....	248
Звуковые волны в воздухе — продольные волны .....	248
Классификация звуков по спектральному составу колебаний источника .....	248
Физиологические характеристики музыкальных звуков .....	250
Эффект Доплера .....	250
<i>Практикум по решению задач</i> .....	251
Механические волны .....	251
Звуковые волны .....	253
Решить самостоятельно .....	254
<i>Контрольные работы</i> .....	255
Контрольная работа повышенного уровня сложности .....	256

## Молекулярная физика. Термодинамика

### **Первоначальные сведения о строении вещества**

<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	258
<i>Примеры решения задач</i> .....	263
<i>Лабораторные работы</i> .....	263
1. Наблюдение диффузии веществ .....	263
2. Наблюдение взаимодействия различных веществ .....	264
3. Изменение поверхностного натяжения воды .....	264
4. Наблюдение капиллярного поднятия жидкости .....	264
<i>Экспериментальные задания</i> .....	265
1. Образование мыльных пленок на каркасах .....	265
2. Наблюдение свойств жидкостей .....	266
3. Изучение образцов твердых тел .....	266
4. Получение кристаллов из паров .....	266
5. Получение кристаллов льда .....	266
<i>Самостоятельные работы</i> .....	266
Самостоятельная работа 1.1 .....	266
Самостоятельная работа 1.2 .....	267
Самостоятельная работа 2.1 .....	267
Самостоятельная работа 2.2 .....	268
Самостоятельная работа 3.1 .....	268
Самостоятельная работа 3.2 .....	268
Самостоятельная работа 4.1 .....	268

**Тепловые явления**

Самостоятельная работа 4.2	269
Самостоятельная работа 5.1	269
Самостоятельная работа 5.2	270
<i>Контрольные работы</i>	270
Контрольная работа 1	270
Контрольная работа 2	270
Контрольная работа 3	271
<i>Для тех, кому стало интересно</i>	271
Газ – основное состояние вещества во Вселенной	271
Значение воздуха для живых организмов	272
Композиты	272
Прочны ли наши кости?	273
Выгодно ли делать детали полыми?	273
Твердость. Минералогическая шкала твердости	273
Жидкие кристаллы	274
<i>Справочный раздел</i>	275
<i>Конспект, таблицы, схемы</i>	276
<i>Практикум по решению задач</i>	279
<i>Лабораторные работы</i>	280
1. Зависимость испарения жидкости от различных факторов	280
2. Плавление кристаллических тел	280
<i>Экспериментальные задания</i>	281
1. Наблюдение изменения температуры при испарении жидкости	281
2. Наблюдение испарения йода	281
3. Наблюдение кипения эфира	281
4. Наблюдение изменения внутренней энергии тела при совершении работы	281
5. Сравнение теплопроводности различных веществ	281
6. Наблюдение теплообмена в воде конвекцией	283
7. Наблюдение теплообмена в воздухе конвекцией	283
<i>Самостоятельные работы</i>	283
Самостоятельная работа 1.1	283
Самостоятельная работа 1.2	284
Самостоятельная работа 2.1	284
Самостоятельная работа 2.2	285
Самостоятельная работа 3.1	285
Самостоятельная работа 3.2	286
Самостоятельная работа 4.1	287
Самостоятельная работа 4.2	287
<i>Контрольные работы</i>	288
Контрольная работа 1	288
Контрольная работа 2	288
Контрольная работа 3	289
<i>Для тех, кому стало интересно</i>	290
<i>Справочный раздел</i>	290

**Кинетическая теория газов**

<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	295
<i>Практикум по решению задач</i> .....	299
<i>Самостоятельные работы</i> .....	299
Самостоятельная работа 1.1 .....	299
Самостоятельная работа 1.2 .....	299
Самостоятельная работа 2.1 .....	300
Самостоятельная работа 2.2 .....	300
Самостоятельная работа 3.1 .....	300
Самостоятельная работа 3.2 .....	301
<i>Контрольные работы</i> .....	302
Контрольная работа 1 .....	302
Контрольная работа 2 .....	303
<i>Справочный раздел</i> .....	304

**Основы термодинамики**

<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	305
Законы термодинамики .....	306
Энтропия .....	307
КПД тепловой машины .....	307
Адиабатный процесс .....	307
Уравнение адиабаты (уравнение Пуассона) .....	307
<i>Самостоятельные работы</i> .....	310
Самостоятельная работа 1.1 .....	310
Самостоятельная работа 1.2 .....	310
Самостоятельная работа 2.1 .....	311
Самостоятельная работа 2.2 .....	312
Самостоятельная работа 3.1 .....	313
Самостоятельная работа 3.2 .....	313
Самостоятельная работа 4 .....	313
Самостоятельная работа 5 .....	314
<i>Контрольные работы</i> .....	316
Контрольная работа 1 .....	316
Контрольная работа 2 .....	316
<i>Итоговый тест</i> .....	317

**Электростатика и постоянный ток****Законы взаимодействия неподвижных зарядов**

<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	326
Законы электростатики .....	328
<i>Экспериментальное задание</i> .....	330
Изучение электризации тел .....	330
<i>Лабораторная работа</i> .....	331
Изучение закона сохранения зарядов и проводимости материалов .....	331
<i>Самостоятельные работы</i> .....	332

	Закон сохранения электрического заряда .....	332
	Закон Кулона .....	333
	Совместное применение закона сохранения электрического заряда и закона Кулона .....	334
	Принцип суперпозиции .....	335
	Совместное применение закона сохранения электрического заряда и принципа суперпозиции .....	336
	Совместное применение законов электростатики и механики .....	336
	<i>Контрольная работа</i> .....	337
	<i>Творческие задания</i> .....	338
<b>Напряженность электрического поля</b>	<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	339
	Электрическое поле .....	339
	Теории дальнего действия и ближнего действия .....	339
	<i>Лабораторная работа</i> .....	342
	Определение направления вектора напряженности электрического поля .....	342
	<i>Самостоятельная работа</i> .....	343
	<i>Практикум по решению задач</i> .....	344
	Определение напряженности электрического поля .....	344
	Поле точечного заряда .....	345
	Принцип суперпозиции .....	346
	Совместное применение понятия напряженности, формулы для напряженности поля точечного заряда, принципа суперпозиции полей и знаний механики .....	346
	<i>Контрольная работа</i> .....	347
	<i>Творческие задания</i> .....	348
<b>Потенциал электрического поля</b>	<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	350
	Энергия разделенных зарядов .....	351
	Энергия электрического поля .....	351
	Потенциальная энергия заряда в электростатическом поле .....	351
	Потенциал металлического шара и сферы .....	352
	<i>Лабораторная работа</i> .....	353
	Изучение условия прекращения перемещения свободных зарядов в металлах .....	353
	<i>Самостоятельная работа</i> .....	353
	<i>Практикум по решению задач</i> .....	354
	Определение потенциала и разности потенциалов .....	354
	Потенциал поля точечного заряда и шара .....	355
	Однородное электрическое поле .....	356
	Потенциал поля нескольких зарядов .....	357
<i>Контрольная работа</i> .....	358	
<i>Творческие задания</i> .....	358	
<b>Работа по разделению зарядов. ЭДС</b>	<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	359
	<i>Лабораторная работа</i> .....	362

### Конденсатор. Энергия электрического поля

### Электрический ток. Носители тока

### Напряжение, сопротивление, закон Ома для участка цепи

Сборка и испытание гальванических элементов .....	362
<i>Самостоятельная работа</i> .....	364
<i>Контрольная работа</i> .....	365
<i>Творческие задания</i> .....	365
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	366
Напряженность поля плоского конденсатора .....	366
Емкость конденсатора .....	367
Емкость батарей конденсаторов .....	368
Энергия конденсатора .....	368
Конденсатор как техническое устройство .....	368
Использование конденсаторов .....	368
<i>Лабораторная работа</i> .....	369
Сборка плоского конденсатора и расчет его мощности .....	369
<i>Самостоятельная работа</i> .....	370
<i>Практикум по решению задач</i> .....	372
Определение емкости конденсатора.	
Движение частиц в конденсаторе .....	372
Энергия конденсатора .....	373
Батареи конденсаторов .....	375
<i>Контрольная работа</i> .....	379
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	380
Носители тока в различных средах .....	380
Действие тока .....	382
Сила тока .....	383
Взаимосвязь силы тока с микрохарактеристиками вещества .....	383
Количественные соотношения при протекании тока	
в различных средах .....	384
<i>Лабораторные работы</i> .....	386
1. Ознакомление с магнитным и тепловым действием тока .....	386
2. Получение медного покрытия на изделии из диэлектрика .....	387
<i>Самостоятельная работа</i> .....	388
<i>Практикум по решению задач</i> .....	390
Определение силы тока .....	390
Связь силы тока в среде со скоростью и концентрацией	
носителей .....	390
<i>Контрольная работа</i> .....	391
<i>Творческие задания</i> .....	391
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	392
Закон Ома для участка цепи .....	393
Сопротивление металлического проводника .....	393
Сопротивление других материалов .....	394
<i>Лабораторная работа</i> .....	395
1. Изучение закона Ома .....	395
2. Определение сопротивления металлических	
проводников правильной формы .....	396

	<i>Самостоятельная работа</i> .....	397
	<i>Практикум по решению задач</i> .....	398
	Закон Ома для участка цепи .....	398
	Расчет сопротивления проводника по геометрическим параметрам .....	399
	<i>Контрольная работа</i> .....	400
	<i>Творческие задания</i> .....	400
<b>Закон Ома для полной цепи</b>	<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	401
	Закон Ома для полной цепи .....	401
	Короткое замыкание .....	402
	Плавкий предохранитель .....	402
	Напряжение на участке цепи, содержащем источник тока .....	402
	<i>Лабораторная работа</i> .....	403
	Измерение ЭДС источника тока и его внутреннего сопротивления .....	403
	<i>Самостоятельная работа</i> .....	403
	<i>Контрольная работа</i> .....	405
	<i>Творческие задания</i> .....	405
<b>Расчет сопротивлений, токов и напряжений</b>	<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	406
	Последовательное соединение элементов .....	406
	Параллельное соединение элементов .....	407
	Метод эквивалентных замен для вычисления эквивалентного сопротивления участка цепи .....	407
	Метод соединения и разъединения точек цепи с одинаковым потенциалом для упрощения расчетов .....	408
	Последовательность решения задач на расчет токов и напряжений в цепи с источником тока (с использованием закона Ома для полной цепи) .....	409
	<i>Лабораторная работа</i> .....	409
	Изучение распределения токов и напряжений в резисторах, соединенных последовательно и параллельно .....	409
	<i>Самостоятельная работа</i> .....	410
	<i>Практикум по решению задач</i> .....	412
	<i>Контрольная работа</i> .....	414
	<i>Творческие задания</i> .....	416
<b>Тепловое действие тока (закон Джоуля-Ленца)</b>	<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	418
	Работа тока .....	418
	Закон Джоуля-Ленца .....	418
	Количество теплоты, выделяющееся в источнике тока .....	419
	Мощность тока и мощность электронагревательного прибора .....	419
	<i>Лабораторная работа</i> .....	419
	1. Изучение устройства лампы накаливания и выделения теплоты на ней .....	419
2. Изучение тепловыделения на нагревателе .....	420	

	<i>Самостоятельная работа</i> .....	421
	<i>Практикум по решению задач</i> .....	421
	<i>Контрольная работа</i> .....	424
<b>Магнитное поле</b>	<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	426
	Постоянные магниты .....	426
	Магнитное поле .....	426
	Магнитное поле тока .....	427
	Вектор магнитной индукции магнитного поля .....	427
	Линии магнитной индукции .....	427
	Картина магнитных полей, созданных постоянными магнитами и проводниками с током .....	428
	Модуль вектора магнитной индукции вблизи прямого провода, кругового витка и внутри цилиндрической катушки (соленоида) .....	429
	Магнитные свойства веществ .....	429
	<i>Лабораторные работы</i> .....	431
	1. Изучение свойств постоянных магнитов .....	431
	2. Измерение модуля вектора магнитной индукции между полюсами подковообразного магнита .....	432
	<i>Самостоятельная работа</i> .....	433
	<i>Контрольная работа</i> .....	435
	<b>Силы Ампера и Лоренца</b>	<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....
Сила Ампера .....		437
Сила Лоренца .....		438
<i>Лабораторная работа</i> .....		441
1. Оценка модуля вектора магнитной индукции подковообразного магнита .....		441
2. Оценка скорости движения электронов в электронно-лучевой трубке .....		442
<i>Самостоятельная работа</i> .....		443
<i>Практикум по решению задач</i> .....		445
<i>Контрольная работа</i> .....		447
<i>Творческие задания</i> .....		448
<b>Применение электроприборов в быту и технике</b>	<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	449
	Приборы постоянного и переменного тока .....	449
	Расход электроэнергии .....	450
	Коэффициент полезного действия (КПД) электроприборов .....	450
	Типы электроприборов .....	451
	Устройство некоторых электроприборов .....	451
	<i>Лабораторные работы</i> .....	455
	1. Измерение КПД электродвигателя .....	455
	2. Проверка правильности работы электрического счетчика .....	455
	<i>Самостоятельная работа</i> .....	456
	<i>Практикум по решению задач</i> .....	458
	<i>Контрольная работа</i> .....	458

## Электромагнитные колебания и волны. Оптика

### Электромагнитные колебания

<b>1. Электромагнитные колебания и средства их описания</b> .....	<b>460</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	<b>460</b>
Колебательный контур .....	461
Теоретическое описание процессов в колебательном контуре .....	461
Графическое описание процессов в колебательном контуре .....	462
Экспериментальное изучение процессов в колебательном контуре .....	463
Автоколебания. Генератор незатухающих колебаний .....	464
Систематизация изученных знаний .....	464
<i>Самостоятельная работа</i> .....	465
<i>Практикум по решению задач</i> .....	467
<b>2. Переменный электрический ток</b> .....	<b>467</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	467
Получение переменного электрического тока .....	467
Электрический ток на участке цепи с резистором .....	468
Электрический ток на участке с индуктивностью .....	469
Переменный электрический ток на участке с конденсатором .....	470
Переменный электрический ток на реальном участке цепи .....	472
Явление резонанса в цепи переменного электрического тока .....	472
Краткое обобщение теоретического материала .....	473
<i>Самостоятельная работа</i> .....	473
<i>Экспериментальные задания</i> .....	475
<i>Практикум по решению задач</i> .....	475
Пример решения качественной задачи .....	475
Вопросы для обсуждения .....	475
Типичные расчетные задачи .....	475
<b>3. Получение, передача и использование переменного электрического тока</b> .....	<b>476</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	476
Получение переменного электрического тока .....	476
Передача переменного электрического тока. Трансформатор .....	477
Использование переменного электрического тока .....	479
<i>Самостоятельная работа</i> .....	480
Ответить на вопросы .....	480
Решить самостоятельно .....	480
<i>Контрольная работа</i> .....	480
<i>Творческие задания</i> .....	481
<i>Итоговый тест</i> .....	481
Задания на понимание процесса познания физических объектов и явлений .....	481
Качественное описание физических объектов и явлений .....	482

Задания на количественное описание физических объектов и явлений .....	483
Задания повышенной сложности .....	484

## Электромагнитные волны

1. Электромагнитное поле. Электромагнитная волна .....	485
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	485
Электромагнитное поле и его частные проявления .....	487
Электромагнитная волна .....	487
<i>Самостоятельная работа</i> .....	491
<i>Контрольная работа</i> .....	491
2. Свойства и характеристики электромагнитной волны .....	492
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	492
Виды электромагнитных волн .....	492
Основные свойства электромагнитной волны .....	493
<i>Самостоятельная работа</i> .....	495
3. Волновые явления .....	496
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	496
Отражение и преломление электромагнитных волн .....	496
Интерференция электромагнитных волн .....	496
Дифракция электромагнитных волн .....	498
Дисперсия электромагнитных волн .....	498
Явление поляризации электромагнитных волн .....	499
<i>Самостоятельная работа</i> .....	499
<i>Творческие задания</i> .....	500
4. Получение, передача и прием радиоволн .....	501
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	501
Принципы современной радиосвязи .....	501
Подробнее о радиопередатчике .....	502
Подробнее о распространении радиоволн .....	502
Подробнее о радиоприемнике .....	502
Радиолокация .....	503
Телевидение .....	505
Развитие средств связи .....	505
<i>Самостоятельная работа</i> .....	506
<i>Контрольная работа</i> .....	506
<i>Творческие задания</i> .....	507

## Свет как Электромагнитная волна

1. Развитие взглядов на природу света .....	508
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	508
Самый «информационный» объект изучения .....	509
<i>Самостоятельная работа</i> .....	510
2. Геометрическая оптика как частный случай волновой оптики .....	510
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	510
Объекты изучения и основные понятия .....	510
Законы распространения света .....	511

<b>3. Волновые свойства света</b> .....	<b>513</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	513
Дисперсия света .....	513
Интерференция света .....	515
Дифракция света .....	516
Поляризация света .....	518
Поглощение света веществом. Цвета тел .....	520
<i>Лабораторные работы</i> .....	520
Наблюдение интерференции и дифракции света .....	520
Измерение длины световой волны с помощью дифракционной решетки .....	521
Контрольные задания .....	522
<i>Самостоятельная работа</i> .....	522
<i>Творческие задания</i> .....	524
<b>1. Электродинамика как физическая теория</b> .....	<b>525</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	525
Шкала электромагнитных волн .....	526
<i>Самостоятельная работа</i> .....	533
Качественные вопросы и задачи .....	533
Примеры наиболее типичных задач .....	533
<i>Итоговый тест</i> .....	533
Задания на понимание методов научного познания .....	533
Задания на качественное описание физических объектов и явлений .....	534
Задания на количественное описание физических объектов и явлений .....	535
Задания повышенной сложности .....	536
<i>Творческие задания</i> .....	536
<b>1. Методологические основания возникновения СТО</b> .....	<b>537</b>
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	537
Кинематика СТО .....	539
Динамика СТО .....	540
Принцип соответствия .....	541
<i>Самостоятельная работа</i> .....	542

## Обобщения электродинамики

## Основные положения специальной теории относительности

## Геометрическая оптика

### Геометрическая оптика

<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	544
Прямолинейное распространение света .....	544
Основные формулы и соотношения .....	549
<i>Практикум по решению задач</i> .....	554
<i>Экспериментальные исследования</i> .....	556
1. Наблюдение прямолинейного распространения света .....	556

2. Наблюдение теней и полутеней .....	556
3. Особенности зрения человека .....	557
<i>Лабораторная работа</i> .....	557
1. Изучение отражения света в плоском зеркале .....	557
<i>Самостоятельные работы</i> .....	558
Работа 1 .....	558
Работа 2 .....	558
Работа 3 .....	559
Работа 4 .....	560
<i>Контрольные работы</i> .....	561
Работа 1 .....	561
Работа 2 .....	564
Работа 3 .....	564

## Физика атома и атомного ядра

### **Кванты**

<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	566
Электроны, кванты и фотоны .....	566
Кванты .....	567
<i>Лабораторная работа</i> .....	568
Исследование зависимости мощности теплового излучения тела от его температуры .....	568
Контрольные вопросы .....	570
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	571
Фотоны .....	571
<i>Лабораторные работы</i> .....	572
Измерение работы выхода электрона при фотоэлектрическом эффекте .....	572
Исследование явления фотоэлектрического эффекта .....	574
<i>Контрольная работа</i> .....	577
Тест № 1 .....	577
<i>Самостоятельная работа</i> .....	578
Самостоятельная работа № 1 .....	578
<i>Для тех, кому стало интересно</i> .....	578
Как делаются научные открытия .....	578
Открытие электрона .....	578
Открытие рентгеновских лучей .....	580

### **Радиоактивность**

<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	582
Радиоактивность и радиоактивные излучения .....	582
<i>Экспериментальные исследования</i> .....	583
Обнаружение явления естественной радиоактивности .....	583
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	584
Методы регистрации частиц .....	584

**Строение атома**

<i>Лабораторные работы</i> .....	587
Наблюдение следов $\alpha$ -частиц с помощью камеры Вильсона .....	587
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	587
Закон радиоактивного распада .....	587
<i>Экспериментальные задания</i> .....	589
Измерение периода полураспада естественного радиоактивного изотопа калия 40 .....	589
<i>Контрольная работа</i> .....	591
Тест № 2 .....	591
<i>Самостоятельная работа</i> .....	592
Самостоятельная работа № 2 .....	592
<i>Для тех, кому стало интересно</i> .....	592
Как делаются научные открытия .....	592
Открытие радиоактивности .....	592
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	594
Планетарная модель атома. Модель атома Томсона .....	594
<i>Лабораторная работа</i> .....	597
Наблюдение линейчатых спектров .....	597
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	597
Экспериментальное обоснование теории Бора .....	597
<i>Лабораторная работа</i> .....	602
Изучение спектра водорода .....	602
<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	603
Волновые свойства частиц .....	603
Электронные оболочки атома .....	605
Лазер .....	612
<i>Контрольная работа</i> .....	614
Тест № 3 .....	614
<i>Самостоятельная работа</i> .....	616
Самостоятельная работа № 3 .....	616
<i>Творческие задания</i> .....	616
Наблюдение линейчатых спектров с помощью лазерного диска .....	617
<i>Для тех, кому стало интересно</i> .....	618
Как делаются научные открытия .....	618
Открытие атомного ядра .....	618

**Атомное ядро**

<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	620
Заряд и масса атомного ядра .....	620
Энергия связи ядра .....	621
Ядерные силы .....	622
Ядерные спектры .....	624
Стабильные и нестабильные ядра .....	625
Ядерные спектры .....	626
<i>Контрольные работы</i> .....	629

	Тест № 4 .....	629
	Тест № 5 .....	630
	<i>Самостоятельная работа</i> .....	631
	Самостоятельная работа № 4 .....	631
	<i>Для тех, кому стало интересно</i> .....	633
	Как делаются научные открытия .....	633
	Открытие протонов и нейтронов .....	633
<b>Ядерные реакции</b>	<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	635
	Ядерные реакции .....	635
	Использование ядерной энергии .....	637
	Элементарные частицы .....	638
	Большой Взрыв и Сверхновые звезды .....	643
	<i>Контрольная работа</i> .....	645
	Тест № 6 .....	645
	<i>Самостоятельная работа</i> .....	646
	Самостоятельная работа № 5 .....	646
	<i>Для тех, кому стало интересно</i> .....	647
	Как делаются научные открытия .....	647
	Открытие деления ядер урана .....	647
<b>Ядерная энергия и экология</b>	<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	649
	Свойства ионизирующих излучений. Взаимодействие ядерных излучений с веществом .....	649
	<i>Лабораторная работа</i> .....	650
	Изучение свойств ядерных излучений .....	650
	<i>Конспект, таблицы, схемы</i> .....	650
	Дозиметрия .....	650
	Естественный фон радиации .....	653
	Опасность радиоактивного загрязнения .....	654
	<i>Контрольная работа</i> .....	658
	Тест № 7 .....	658
	<i>Для тех, кому стало интересно</i> .....	659
	Зачем делаются научные открытия .....	659
<b>Ответы и решения</b>	.....	661

# Предисловие

## Кому адресовано пособие?

*Пособие полезно учащимся, которые не могут разобраться в многообразии программ и учебников, кто хочет понять, что именно должен знать по физике современный школьник. Любой ученик, ознакомившийся с приведенным в пособии теоретическим материалом, выполнивший самостоятельные и контрольные работы, может считать, что он овладел школьным курсом физики.*

*Пособие необходимо тем учащимся, которым хотелось бы быстро и качественно повторить материал перед выпускным или вступительным экзаменом, наверстать упущенное по болезни или изучить самостоятельно какую-то тему.*

*Пособие интересно тем учащимся, кто понимает, что физика — наука не только теоретическая, но и экспериментальная. Оно включает практические и лабораторные работы. Проводя их в школьной лаборатории или дома, вы не только сами откроете великие законы физики (до вас их открывали великие Ньютон, Ом, Фарадей, Джоуль, Резерфорд), но и приобретете экспериментальные навыки, которыми должен обладать выпускник средней школы.*

*Пособие необходимо учителю, который только что пришел в школу и хочет понять, каков уровень*

требований по физике для гуманитарного и профильного классов. Оно необходимо тем, кто еще не создал свои проверочные и контрольные работы.

*Пособие полезно и тому учителю, который уже давно работает в школе, но продолжает поиск новых задач, тестов, вопросов для фронтальных опросов, контрольных по проверке соответствия требованиям новых образовательных стандартов, творческих заданий для способных детей.*

*Пособие поможет родителям, которые интересуются учебной работой своих детей и хотят помочь им в овладении программой по физике. Пользуясь этим пособием, вы быстро освежите в памяти материал по предмету и определите уровень подготовленности своих детей, используя контрольные работы.*

## Как пользоваться пособием?

Пособие не заменяет учебник, а дополняет его. С его помощью вы разберетесь в том, что осталось неясным после изучения темы по учебнику. Для изучения каждой темы необходимо ознакомиться с конспектом, изучить содержание схем, постараться выполнить (самостоятельно или с учителем) экспериментальные задания.

Конспект содержит сводку понятий темы, обобщает и, если это необходимо, дополняет материал учебника по теме.

**Схемы и таблицы** содержат ту же информацию в структурированном виде, в форме, удобной для запоминания. Кроме того в пособии имеются справочные таблицы (они содержат числовые значения физических величин, необходимые для решения задач) и обобщающие схемы (содержат сравнение или сводку информации из разных тем или разных разделов физики и техники).

**Самостоятельные работы** включают в себя обучающие тесты и практикумы по решению задач. Самостоятельная работа — это компонент процесса обучения, а не контроля знаний.

*Тесты* все чаще используются для контроля знаний в России, но с их помощью можно и обучаться. Только следует помнить, что при выполнении обучающего теста нужно чаще заглядывать в раздел «Конспект. Таблицы. Схемы», а не в раздел «Ответы и решения». В вариантах ответов мы постарались собрать наиболее частые ошибки учеников. Учитесь на чужих ошибках, анализируйте неверные ответы!

В **практикуме по решению задач** необходимо изучить разбор типовой задачи, а затем приступить к решению. Обратите внимание на оформление задачи, на чертеж и на единицы измерения. Мы постарались в ходе усложнения уровня задач подсказать, в какую сторону идет усложнение, выделяя группы задач отдельными рубриками.

**Контрольная работа** во многих случаях включает помимо традиционных задач задания по освоению экспериментальных навыков и вопросы с выбором ответа (тестовые задания). Для ребят, работающих с пособием самостоятельно, необходимо самим соблюдать временные рамки работы и, в случае пробелов, позаниматься дополнительно.

Все части материалов пособия содержат несколько уровней сложности. **Уровень А** достаточен для гуманитарных классов и с избытком перекрывает уровень требований для выпускников 9 класса. **Уровень Б** — для общеобразовательных классов, для тех, кто хочет сдать на 4 и 5 выпускной экзамен средней школы и вступительный экзамен в технический вуз. **Уровень В** — для тех, кто планирует поступление в вуз с более высокими требованиями по физике, чем требования Российского стандарта для средней школы. **Творческие задания** — для тех ребят, кто увлекается историей физики, стремится применить свои знания для решения необычных задач. Они содержат задачи и задания олимпиад и задания, требующие умения работать с дополнительной литературой.

**Лабораторные и практические работы**, какими бы простыми они ни казались, обязательны для выполнения, ибо навыки экспериментальной работы входят в требования стандарта по курсу физики. Мы постарались насытить пособие наиболее практическими работами, которые вы выполните, пользуясь предметами, имеющимися у вас дома или приобретенными в хозяйственном магазине.

Учитель волен использовать части пособия по своему усмотрению: обобщающие схемы, самостоятельные или проверочные работы в классе, фронтальные опросы с использованием вопросов обучающего теста, темы для докладов и т. д. Мы не всегда дробили темы на уровень 7, 8, 9, 10 и 11 класса, так как уровень подготовки учащихся, разные программы и учебники делают учебный процесс весьма гибким. Главное — соответствие требованиям стандарта 9 класса в конце основной школы и соответствие требованиям для класса определенного профиля (А, Б, В) в конце средней школы.

*Желаем Вам успешной работы с предлагаемым учебным пособием!*

*Коллектив авторов*

# *Механика*

- ◆ Механические явления и методы исследований
- ◆ Кинематика
- ◆ Динамика
- ◆ Законы сохранения в механике
- ◆ Механические колебания и волны



# Механические явления и методы их исследований

## Изучив эту тему,

- вы узнаете, что основы научного метода исследования явлений природы создал Г. Галилей;
- поймете, в чем сущность научного метода исследований, как его применять;
- научитесь пользоваться простейшими измерительными приборами, составлять и применять развернутые планы своего ответа, строить графики, проводить приближенные вычисления

Ниже представлены в виде блок-схемы (схема 1) основные механические явления (движение и взаимодействие тел), с которыми вы познакомитесь при чтении первого (вводного) раздела. Вы узнаете, что явления могут быть описаны разными способами, с использованием разных понятий.

Взаимодействия тел количественно и качественно описываются с помощью понятий **сила** и **энергия**. Три главные силы объясняют механические явления: **силы тяжести, упругости, трения**.

Вы узнаете, как исследуются явления природы, в чем сущность научного метода познания.

Вы научитесь одному из способов ясного и логичного изложения материала, его быстрого запоми-

## Основные понятия:

Механические явления • Научный метод • Скорость  
• Путь • Погрешности измерений: абсолютная и относительная

нания. Это — способ обобщающих развернутых планов.

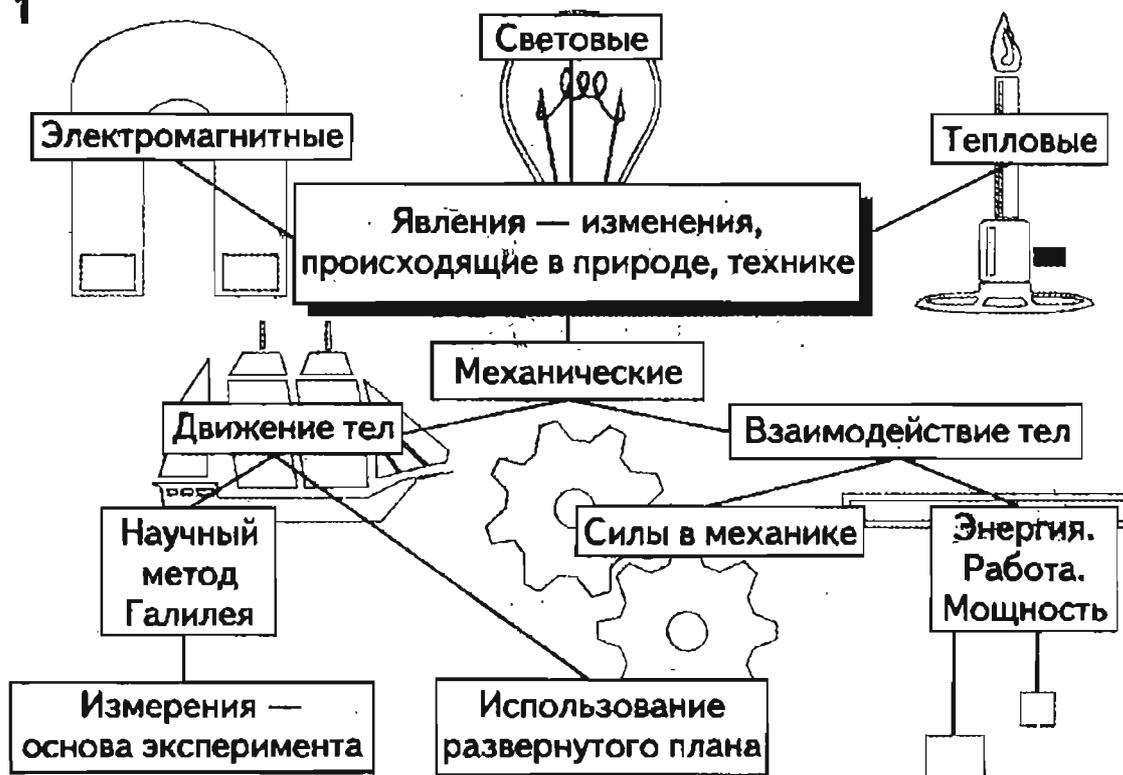
В разделе есть специальный справочник, из которого можно получить ответы на вопросы о том, как проводить измерения и вычисления, строить графики.

**Развернутые планы** — удобное средство обобщений, изложения, запоминания.

**При описании явлений** целесообразно придерживаться следующего плана:

1. Внешние признаки явления.
2. Условия его протекания.
3. Особенности.

**СХЕМА 1**



4. Связь данного явления с другими.
5. Величины, характеризующие явление.
6. Примеры «из жизни», природы, техники.

При рассказе о физических величинах необходимо отразить:

1. Явления или свойства, которые характеризуют физические величины.
2. Определение величины.
3. Расчетную формулу.
4. Единицы измерения физической величины.
5. Способы измерения физической величины.

О физических законах важно знать:

1. Формулировку и математическое выражение закона.
2. Опыты, подтверждающие его справедливость.

3. Примеры учета и применения на практике; примеры явлений природы, протекающих в соответствии с законом.
4. Условия применения.

При рассказе о научном методе исследований или его применении важно остановиться на следующих этапах:

1. Постановка проблемы.
2. Формулировка гипотезы (одной или нескольких), основанной на анализе фактов.
3. Предсказание следствий из каждой гипотезы.
4. Экспериментальная проверка следствий.
- 5.1. Формулировка выводов, объединяющих основные понятия: гипотеза, логические следствия, эксперимент.

# 1. МЕХАНИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, ВЕЛИЧИНЫ, ЗАКОНОМЕРНОСТИ (УРОВЕНЬ А)

*Конспект.  
Таблицы. Схемы*

## Движение тел

### Внешние признаки движения тел

Движение тела относительно. Если изменяется положение тела относительно других тел, то это является признаком, отсырая на который делается заключение о движении данного тела относительно тела отсчета (другого тела).

Внешние признаки могут быть положены в основу определения: изменение с течением времени положения тела относительно других тел называется механическим движением.

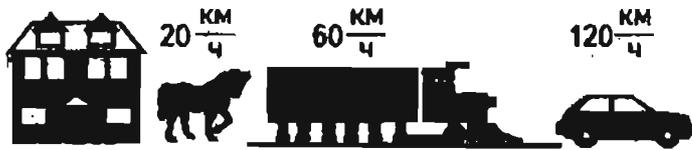


Рис. 1. Движение относительно

Условия, при которых происходит движение тел

Условия, при которых происходит движение тела относительно выбранного тела отсчета, зависят от характера и особенностей движения.

Например тело движется равномерно и прямолинейно, если оно не взаимодействует с другими телами, или действие других тел уравновешивается, компенсируется.

При действии на тело других тел скорость тела изменяется, тело движется с ускорением. Например при падении тела на Землю из состояния покоя

скорость тела увеличивается за 1 секунду на  $9,8 \frac{м}{с}$ .

### Особенности механических явлений

Особенности механических явлений легко позволяют отличить их от других физических явлений: тепловых, световых, электрических, магнитных.

Механические явления — простейшие из физических явлений: достаточно обнаружить изменение

положения тела относительно других тел, или частей одного и того же тела относительно друг друга, чтобы сделать заключение о протекании явления.

При исследовании механических явлений необходимы самые простые средства измерения: приборы для измерения времени (часы) и расстояний.

Механические явления чаще всего сопровождают другие физические явления, а также разнообразные природные процессы.

Несмотря на относительную простоту механических явлений, они играют важнейшую роль в технике, создании теорий, исследовании свойств пространства и времени.

### Механические явления связаны с другими физическими явлениями

При движении двух трущихся друг о друга твердых тел происходит их нагревание (тепловые явления), при пропускании электрического тока через электродвигатель (электромагнитные явления) ротор двигателя начинает вращаться.

Некоторые характеристики механического движения приведены в табл. 1 и на рис. 2.

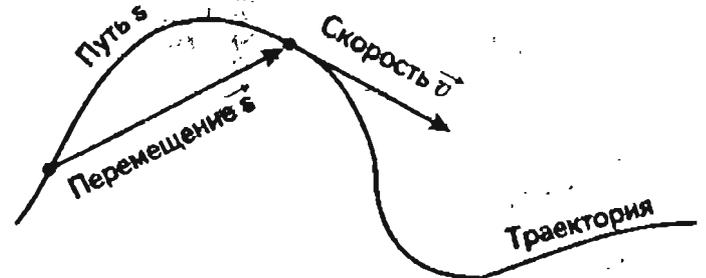


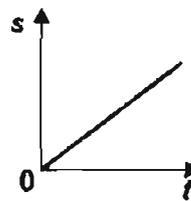
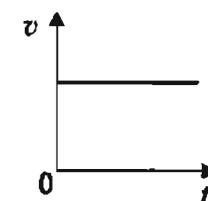
Рис. 2. Скорость, путь, траектория, перемещение

## Взаимодействие тел: силы и энергия взаимодействия

### Силы взаимодействия в механике

При исследовании движения тел относительно Земли установлено, что признаком взаимодействия тел является изменение их скоростей или положения частей тела (деформация) относительно друг друга.

Таблица 1

Название	Скорость	Путь
Обозначение	$v$	$s$
Формула	$v = \frac{s}{t}$	$s = v \cdot t$
Единицы	$1 \frac{м}{с}; 1 \frac{км}{час}$	$1 м; 1 км = 1000 м$
Приборы	Спидометр	Одометр
Графики		
Примеры	Земля вокруг Солнца проходит в 1 с 30 000 м. Придумайте сами	Черепаша $v = 0,05 \frac{м}{с}$ Придумайте сами

Обозначается чаще всего заглавными буквами латинского алфавита:  $\vec{P}, \vec{F}, \vec{Q}, \vec{N}$ . Единица измерения модуля силы — 1 ньютон (1 Н).

Большинство механических явлений могут быть объяснены на основе трех сил: трения, упругости, всемирного тяготения (рис. 4, табл. 2).

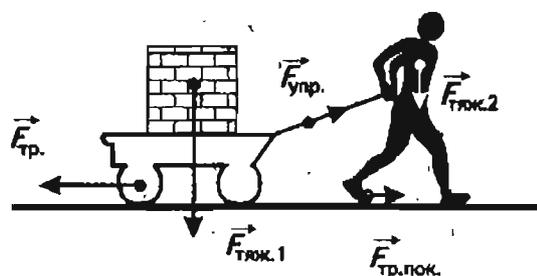
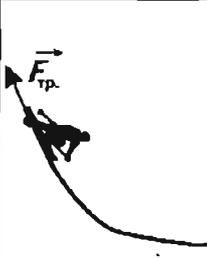
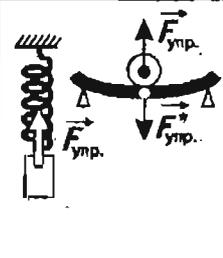
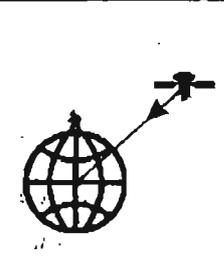
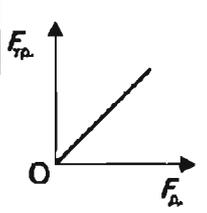
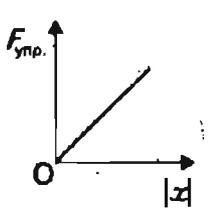
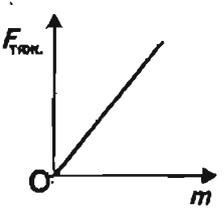


Рис. 4. Три силы, объясняющие механические явления

Таблица 2

Сила трения	Сила упругости	Сила всемирного тяготения
		
		

В результате взаимодействия тел изменяется энергия движения ( $E_{кин.}$  — кинетическая энергия) тел,

$$E_{кин.} = \frac{mv^2}{2} \text{ (рис. 5).}$$

Взаимодействие тел: давление и его передача

Давление обозначается латинской буквой  $p$  и определяется по формуле  $p = \frac{F}{S}$ . Единицей измерения

давления служит паскаль:  $1 Па = 1 \frac{Н}{м^2}$ .

Если тело не взаимодействует с другими телами, то его скорость не изменяется (явление инерции).

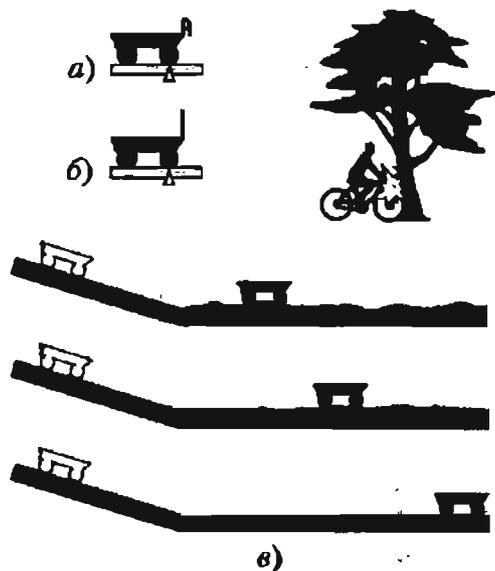


Рис. 3. Только при взаимодействии тел изменяется их скорость

Сила — одна из количественных характеристик взаимодействия тел. Сила — величина векторная.

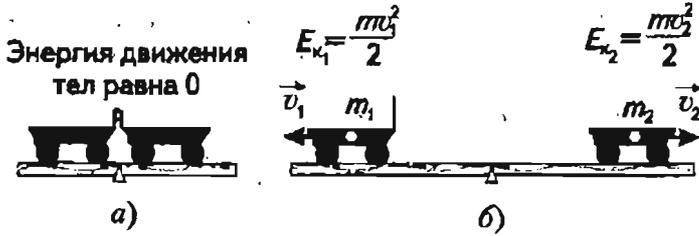


Рис. 5. В результате взаимодействия тел они приобретают кинетическую энергию

**Закон Паскаля**

Давление, производимое на жидкость или газ, передается без изменения в каждую точку жидкости или газа.

**Условия применения**

Закон Паскаля справедлив только для газов и жидкостей, потому что частицы, из которых состоят газ и жидкость, слабо взаимодействуют друг с другом, легко подвижны.

**Применение закона Паскаля.** Давление жидкости (и газа) и давление внутри жидкости:

$$p_{\text{жидкости}} = \rho gh;$$

$\rho$  — плотность,

$$g = 9,8 \frac{\text{Н}}{\text{кг}},$$

$h$  — глубина.

Внешнее давление  $p_0$  передается во все точки жидкости без изменения:

$$p = p_0 + p_{\text{жидкости}} = p_0 + \rho gh.$$

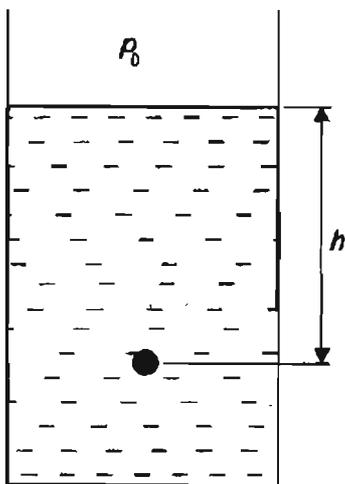


Рис. 6. Давление внутри жидкости

Архимедова сила ( $F_A$ ):

$$F_A = \rho_{\text{ж}} \cdot V_{\text{в.ж}} \cdot g$$

$\rho_{\text{ж}}$  — плотность жидкости,

$V_{\text{в.ж}}$  — объем вытесненной жидкости,

$$g = 9,8 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}.$$

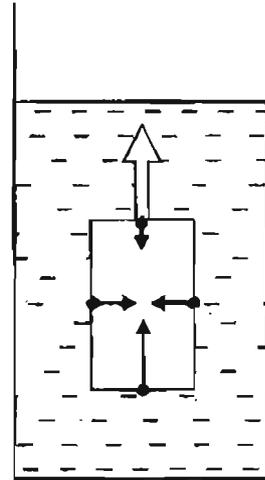


Рис. 7. Возникновение архимедовой силы

**Гидравлические машины**

Физические основы действия гидравлических машин:

$$p_1 = p_2 = p;$$

$$p_1 = \frac{F_1}{S_1}; p_2 = \frac{F_2}{S_2};$$

$$F_2 = S_2$$

$$F_1 = S_1$$

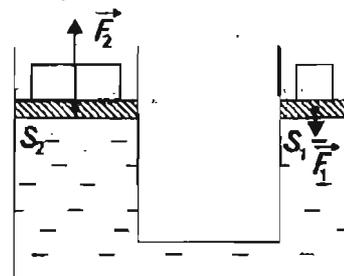


Рис. 8. Модель гидравлической машины

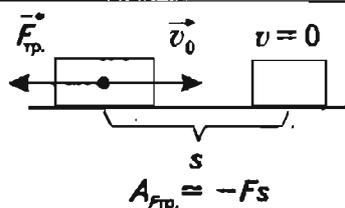
**Энергия взаимодействия**

Взаимодействие тел может характеризоваться энергией. Например энергия взаимодействия Земли и тела, находящегося на небольшой высоте  $h$  над

*Экспериментальные исследования*

Землей, вычисляется по формуле  $mgh$ . Энергия взаимодействия — потенциальная энергия  $E_{\text{пот}}$

Изменение механической энергии происходит при перемещении тела под действием силы, т. е. при совершении работы  $A$  (рис. 9, 10).



Кинетическая энергия уменьшается в результате действия силы трения. Сила трения совершает отрицательную работу.

Рис. 9. Работа силы трения отрицательна

Работа  $A$  равна уменьшению потенциальной энергии; работа  $A$  равна увеличению кинетической энергии.

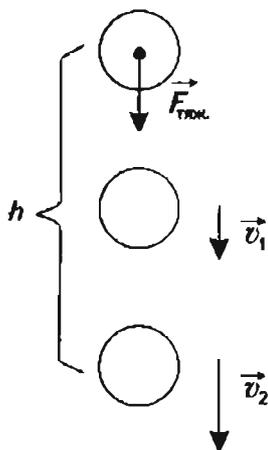


Рис. 10. Работа силы тяжести положительна

**Мощность** — изменение энергии в 1 секунду.

Таблица 3. Физические величины

Название	Работа	Мощность	Энергия
Обозначение	$A$	$N$	$E$
Единицы	Дж = Н·м	Вт = $\frac{\text{Дж}}{\text{с}}$	Дж
Формула	$A = F \cdot S$	$N = \frac{A}{t}$	(изменение энергии) = работа

**Исследование силы трения**

Цель работы: научиться измерять силу трения.

Приборы и материалы: набор грузов массой по 0,1 кг каждый, динамометр с пределом измерения 4 Н, брусок массой 0,1 кг (рис. 11).

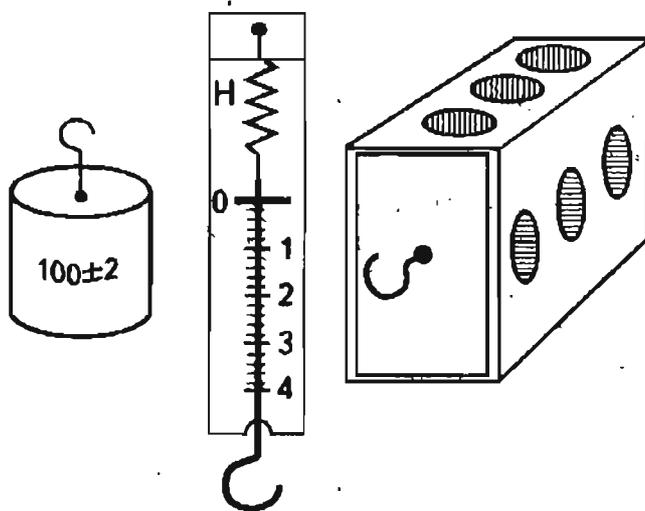


Рис. 11. Оборудование для исследования силы трения

Для измерения силы трения ученик перемещал брусок по столу равномерно (рис. 12).

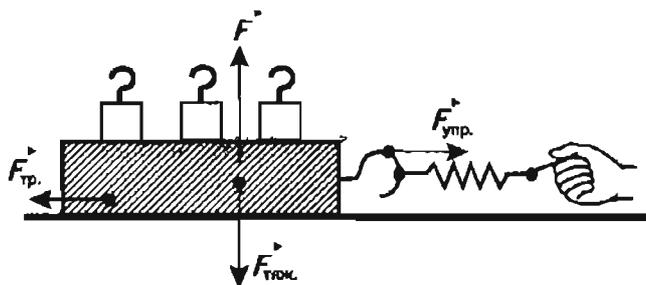


Рис. 12. Измерение силы трения

По результатам эксперимента ученик отметил точки на координатной плоскости ( $F_{\text{тр}}$ ,  $F_{\text{дав}}$ ) и построил график зависимости силы трения  $F_{\text{тр}}$  от силы давления  $F_{\text{дав}}$  (рис. 13).

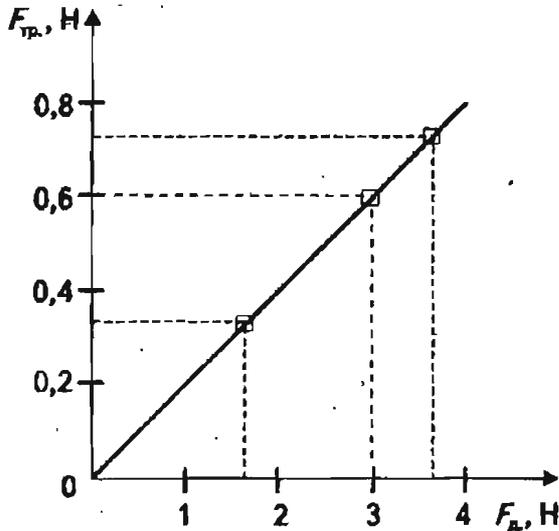


Рис. 13. Построение графика по результатам эксперимента

**Исследование силы упругости**

**Работа 1**

Цель работы: научиться строить график зависимости силы упругости от деформации.

Приборы и материалы: динамометр с пределом измерения 4 Н, линейка (рис. 14).

Воспользовавшись динамометром и линейкой, постройте график зависимости модуля силы упругости пружины  $F_{упр}$  от модуля деформации  $|x|$ .

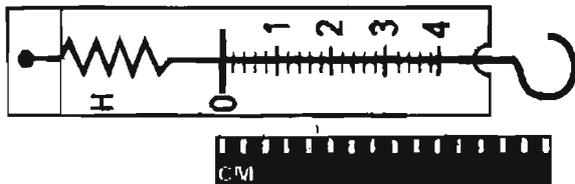


Рис. 14. Исследование пружины динамометра

**Работа 2**

Цель работы: научиться определять границы внутри которых сила пропорциональна деформации.

Приборы и материалы: резиновый образец, картонная коробка, линейка, набор монет разного достоинства.

Исследуйте зависимость силы упругости от модуля удлинения резинового образца (рис. 15). В качестве грузов для растяжения используйте монеты. Массы монет приведены в табл. 4.

Таблица 4. Массы монет

Достоинство монеты	5 руб.	2 руб.	1 руб.	50 коп.	10 коп.
Масса монеты, г	6,5	5	3,5	3	2

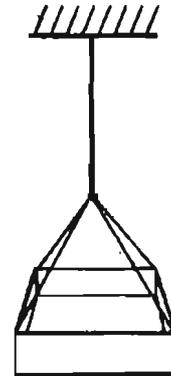


Рис. 15. Резиновый образец, спичечная коробка, монеты — вот все, что нужно для проведения интересного исследования

По результатам испытаний заполните таблицу:

$F_{упр}$ , Н					
Модуль удлинения					

Какой из графиков, представленных на рис. 16, соответствует полученной зависимости? Определите границы области ( $F_0, x_0$ ), внутри которой сила упругости пропорциональна деформации.

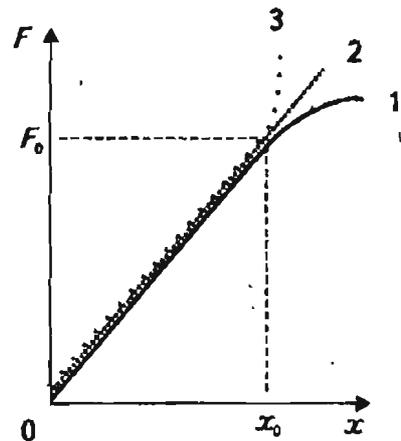


Рис. 16. Как определить «границы пропорциональности»

*Самостоятельная  
работа*

1. Какое из предложенных слов обозначает физическое тело?
  - А. Самолет.
  - Б. Звук.
  - В. Метр.
  - Г. Кипение.
  - Д. Скорость.
2. Какое из предложенных слов обозначает физическую величину?
  - А. Часы.
  - Б. Алюминий.
  - В. Килограмм.
  - Г. Сила.
  - Д. Земля.
3. Какое из предложенных слов обозначает физическое явление?
  - А. Сила.
  - Б. Килограмм.
  - В. Атом.
  - Г. Весы.
  - Д. Испарение.
4. Какое из предложенных слов обозначает единицу измерения физической величины?
  - А. Длина.
  - Б. Секунда.
  - В. Плавление.
  - Г. Атом.
  - Д. Элемент.
5. Какое из приведенных ниже выражений используется для вычисления силы тяжести?
  - А.  $\rho V$ .
  - Б.  $\frac{m}{\rho}$ .
  - В.  $gV$ .
  - Г.  $mg$ .
  - Д.  $\frac{m}{g}$ .
6. Как называют явление сохранения скорости движения тела при отсутствии действия на него других тел?
  - А. Полет.
  - Б. Инерция.
  - В. Движение.
  - Г. Покой.
  - Д. Свободное падение.
7. Чему, примерно, равна сила, действующая на тело массой 50 кг, находящееся на Земле?
  - А. 0,2 Н.
  - Б. 5 Н.

- В. 10 Н.
- Г. 50 Н.
- Д. 500 Н.

8. В соревновании по перетягиванию каната участвуют четыре человека. Двое из них тянут канат, прикладывая силы  $F_1 = 250$  Н и  $F_2 = 200$  Н, вправо; двое других — силы  $F_3 = 350$  Н и  $F_4 = 50$  Н, влево. Какова равнодействующая этих сил? В каком направлении будет двигаться канат?
  - А. 850 Н, вправо.
  - Б. 450 Н, вправо.
  - В. 350 Н, влево.
  - Г. 100 Н, влево.
  - Д. 50 Н, вправо.
9. На рис. 17 изображен график скорости равномерного движения. Определите скорость движения тела через 4 с после начала движения.

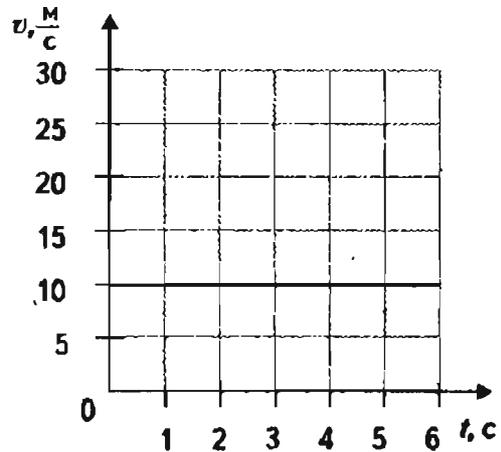


Рис. 17

- А.  $50 \frac{m}{c}$ .
  - Б.  $2,5 \frac{m}{c}$ .
  - В.  $10 \frac{m}{c}$ .
  - Г.  $0 \frac{m}{c}$ .
  - Д.  $40 \frac{m}{c}$ .
10. На рис. 18 изображен график пути равномерного движения. Определите скорость движения тела через 4 с после начала движения.
    - А.  $2,5 \frac{m}{c}$ .
    - Б.  $5 \frac{m}{c}$ .

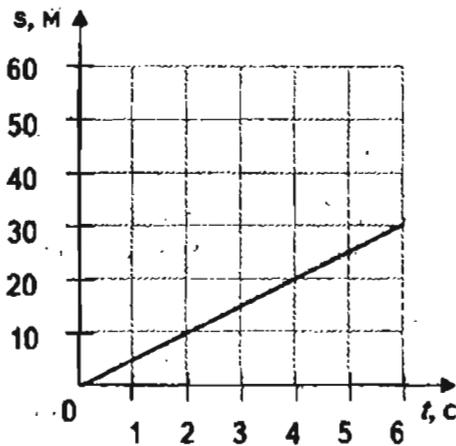


Рис. 18

- В.  $20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$        Г.  $40 \frac{\text{м}}{\text{с}}$   
 Д.  $80 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

11. На рис. 19 изображен график скорости равномерного движения. Определите путь, пройденный телом за 2 с после начала движения.

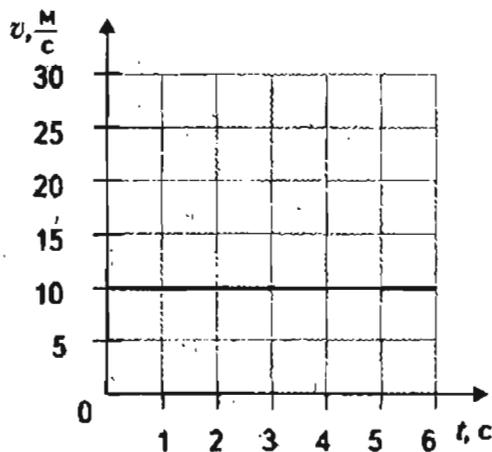


Рис. 19

- А. 50 м.       Б. 30 м.  
 В. 20 м.       Г. 10 м.  
 Д. 5 м.

12. Какую физическую величину определяют по формуле  $p = \frac{F}{S}$ ?

- А. Работу.  
 Б. Мощность.  
 В. Давление.  
 Г. Коэффициент полезного действия.  
 Д. Энергию.

13. Какая физическая величина определяется как произведение силы на путь, пройденный по направлению действия силы?

- А. Работа.       Б. Энергия.  
 В. Мощность.       Г. Давление.  
 Д. Скорость.

14. Какое давление на пол оказывает ковер весом 200 Н площадью 4 м<sup>2</sup>?

- А. 50 Па.       Б.  $\approx 5$  Па.  
 В.  $\approx 800$  Па.       Г.  $\approx 80$  Па.  
 Д.  $2 \cdot 10^2$  Па.

15. Какова мощность двигателя, совершившего работу 2000 Дж за 4 с?

- А. 800 Вт.       Б. 500 Вт.  
 В. 0,02 Вт.       Г. 8000 кВт.  
 Д. 500 кВт.

16. Каково давление внутри жидкости плотностью

$900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  на глубине 30 см?

- А. 270 000 Па.  
 Б. 27 000 Па.  
 В. 2 700 Па.  
 Г. 3 000 Па.  
 Д. 30 000 Па.

17. В гидравлическом прессе на малый поршень площадью 10 см<sup>2</sup> действует сила 100 Н. Какая сила действует на большой поршень площадью 1 м<sup>2</sup>?

- А. 10 Н.       Б. 100 Н.  
 В. 1000 Н.       Г. 10 000 Н.  
 Д. 100 000 Н.

*Контрольная  
работа*

1. Физические величины: плотность вещества, работа, мощность, скорость тела, сила тяжести — выражаются с помощью формул. Какая из приведенных формул является формулой работы?

- А.  $N = \frac{A}{t}$        Б.  $\rho = \frac{m}{V}$   
 В.  $A = Fs$        Г.  $P = mg$   
 Д.  $V = \frac{s}{t}$

2. Брусок движется по горизонтальному столу. Сила упругости, действующая на брусок со стороны стола, сила тяжести, сила трения, сила упругости, действующая на брусок со стороны нити, вес тела изображены на рис. 20. На каком рисунке показана сила тяжести?

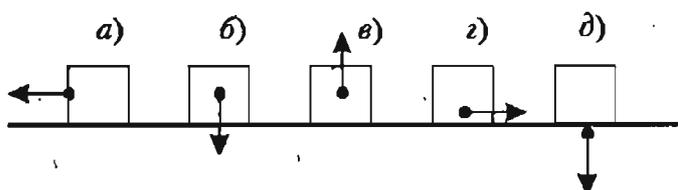


Рис. 20

- А. На рис. а).       Б. На рис. б).  
 В. На рис. в).       Г. На рис. з).  
 Д. На рис. д).

3. Сила тяжести, действующая на брусок, составляет 9,8 Н. Чему равна масса бруска?

- А. 9,8 кг.       Б. 1 кг.  
 В. 980 кг.       Г. 98 кг.  
 Д. 4,9 кг.

4. Мощность двигателя комнатного вентилятора 36 Вт. Чему равна работа, совершенная при заданной мощности за 20 с?

- А. 1,8 Дж.       Б. 36 Дж.  
 В. 20 Дж.       Г. 720 Дж.  
 Д. 360 Дж.

5. Стальной шарик падает с некоторой высоты на землю. Как изменяется кинетическая и потенциальная энергия шарика?

- А. Кинетическая энергия уменьшается, потенциальная энергия увеличивается.  
 Б. Кинетическая энергия увеличивается, потенциальная уменьшается.  
 В. Кинетическая и потенциальная энергия не изменяются.  
 Г. Кинетическая энергия увеличивается, потенциальная не изменяется.  
 Д. Кинетическая энергия не изменяется, потенциальная увеличивается.

6. Колонна автобусов движется по шоссе со скоростью  $30 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ . Ее обгоняет мотоциклист, движущийся по шоссе со скоростью  $70 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ . Какова скорость мотоциклиста относительно колонны?

- А.  $30 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$        Б.  $70 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$   
 В.  $40 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$        Г.  $100 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$   
 Д. Среди ответов А — Г нет правильного.

7. Мальчик толкнул сани по горизонтальной заснеженной дороге. Они проехали некоторое расстояние и остановились. Назовите силу, вызывающую изменение скорости саней после толчка.

- А. Сила упругости, действующая на сани вертикально вверх.  
 Б. Сила трения.  
 В. Сила тяжести, действующая на сани.  
 Г. Вес саней.  
 Д. Среди ответов А — Г нет правильного.

8. Кто из ученых установил, что на тело, находящееся в жидкости, действует выталкивающая сила, равная весу жидкости в объеме этого тела?

- А. Г. Галилей.       Б. Э. Торричелли.  
 В. Б. Паскаль.       Г. Архимед.  
 Д. Среди ответов А — Г нет правильного.

9. Дан график зависимости пути  $s$ , пройденного телом, от времени  $t$  при равномерном прямоли-

нейном движении (рис. 21). Определите путь, пройденный телом за 8 с.

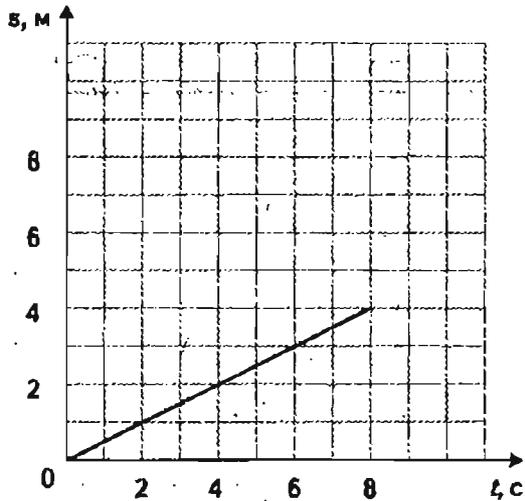


Рис. 21

- А. 6 м.             Б. 5 м.  
 В. 4 м.             Г. 3 м.  
 Д. 2 м.

10. По графику зависимости пути  $s$  от времени  $t$  (рис. 21) при равномерном прямолинейном движении определите скорость тела.

- А. 0.             Б.  $0,5 \frac{м}{с}$ .  
 В.  $1 \frac{м}{с}$ .         Г.  $1,5 \frac{м}{с}$ .  
 Д.  $2 \frac{м}{с}$ .

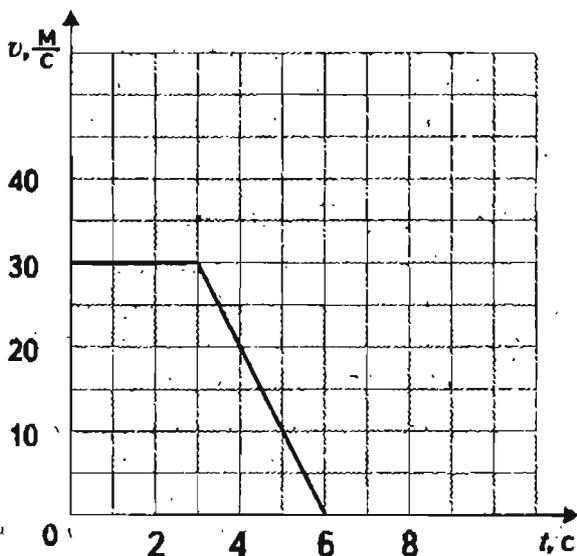


Рис. 22

11. На рис. 22 изображен график зависимости скорости велосипедиста от времени его движения. В какой промежуток времени скорость велосипедиста остается постоянной?

- А. 0 – 4 с.       Б. 0 – 3 с.  
 В. 0 – 6 с.       Г. 3 – 6 с.  
 Д. 4 – 6 с.

12. На сани в горизонтальном направлении (рис. 23) действуют сила упругости  $F_{упр} = 85 \text{ Н}$  и сила трения скольжения  $F_{тр} = 15 \text{ Н}$ . Чему равна и как направлена равнодействующая этих сил?



Рис. 23

- А. 100 Н, влево.     Б. 100 Н, вправо.  
 В. 70 Н, влево.     Г. 70 Н, вправо.  
 Д. Среди ответов А – Г нет правильного.

13. Из колодца поднимают ведро с водой. Когда легче удерживать ведро, наполненное водой?

- А. Ведро полностью погружено в воду.  
 Б. Ведро не погружено в воду.  
 В. Ведро наполовину погружено в воду.  
 Г. Ведро на одну четверть погружено в воду.  
 Д. Среди ответов А – Г нет правильного.

14. За единицу давления принимается 1 Па. Какая из приведенных единиц равна 1 Па?

- А.  $1 \frac{Н}{м^2}$ .       Б.  $1 \frac{Н}{м}$ .  
 В.  $1 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .       Г.  $1 \frac{Н\text{м}}{с}$ .  
 Д.  $1 \frac{м}{с}$ .

15. На рис. 24 изображены две тележки. После пережигания нити, связывающей их, они приобрели разные скорости. Скорость тележки I ока-

залась в 3 раза больше скорости тележки II. Чему равна масса тележки II, если масса тележки I равна 2 кг?

- А. 1,5 кг.       Б. 0,66 кг.  
 В. 6 кг.         Г. 3 кг.  
 Д. 2 кг.

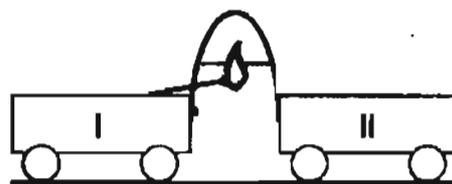


Рис. 24

## 2. МЕТОДЫ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ (УРОВЕНЬ Б)

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

Основоположителем научного метода исследований явлений природы был Г. Галилей. Результаты исследования Г. Галилея были изложены в его знаменитых «Диалогах».



Будущий великий ученый Галилео Галилей родился в 1564 г. в итальянском городе Пизе, известном своей знаменитой наклонной башней. Галилей учился в Пизанском университете, где сначала изучал медицину. Затем, бросив заниматься медициной, он уехал во Флоренцию, где изучал математику и механику. В 1589 г. Галилей — уже

профессор математики этого университета. Здесь он занимался исследованиями по механике и астрономии: изучал законы падения тел, движения тел по наклонной плоскости и вел астрономические наблюдения. В 1609 г. он сконструировал первый телескоп, который давал увеличение в 30 раз.

После выхода в свет «Диалогов» Галилей в 1632 г. был вызван в Рим, где предстал перед судом инквизиции. Начался знаменитый процесс Галилея. Книга Галилея находилась под запретом вплоть до 1822 г., однако уже в середине XVII в. учение Коперника и Галилея быстро распространяется в Европе.

Сочетание эксперимента и теории — сущность научного метода, созданного Г. Галилеем. Элементы этого метода представлены на схеме 2.

В качестве примера использования научного метода рассмотрим, как в соответствии с ним Галилей решил многовековую проблему свободного падения тел — движения тела из состояния покоя под

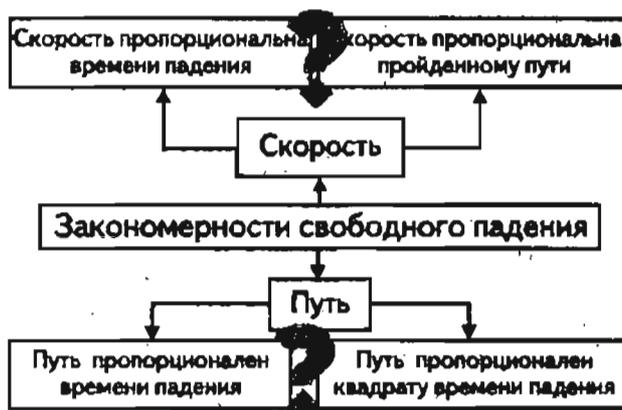


Рис. 25

действием только силы тяжести. Ему удалось установить две закономерности такого движения, выбирая из двух гипотез (рис. 25).

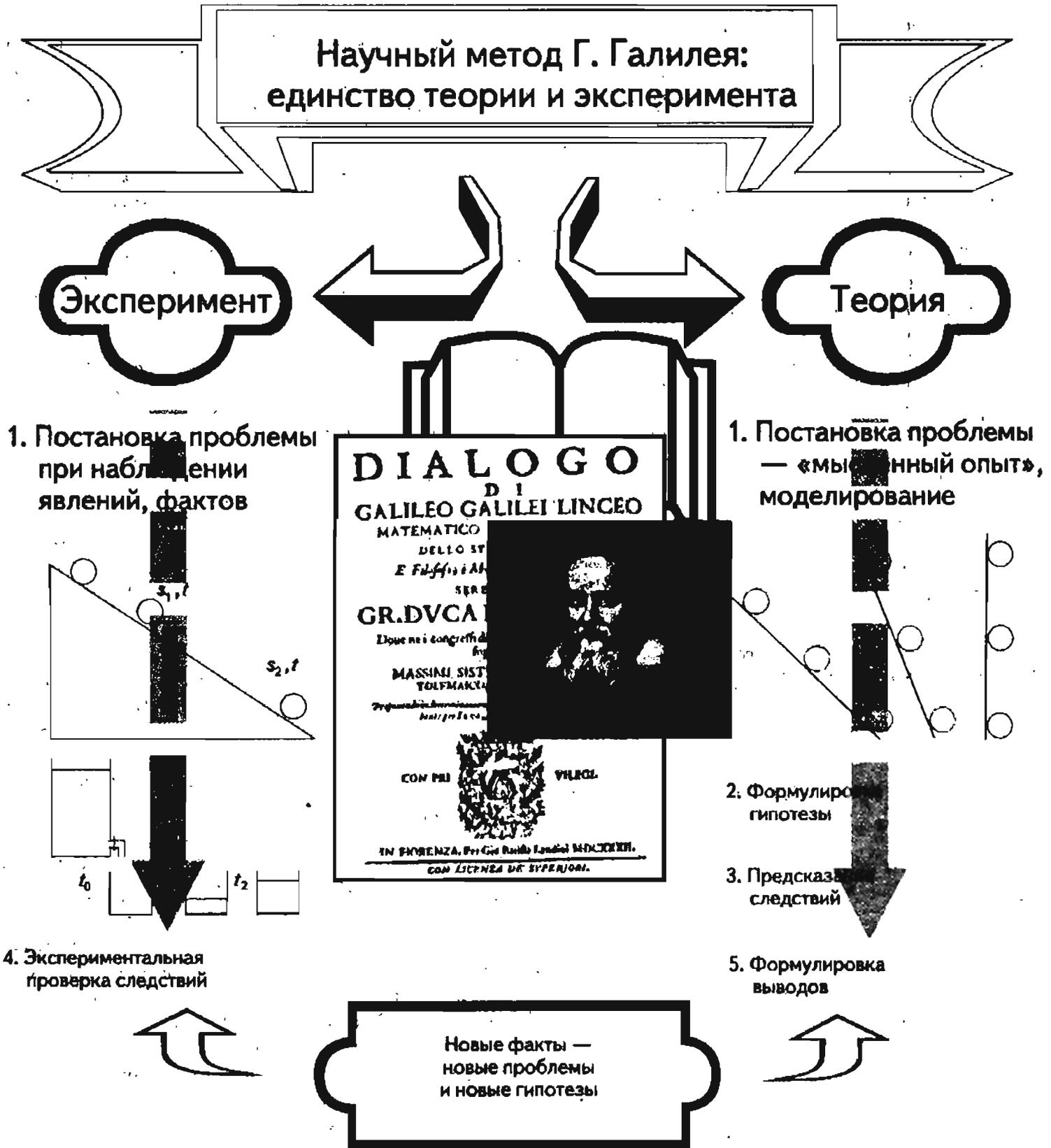
Только применение научного метода позволило Г. Галилею преодолеть огромные трудности. Методов измерения скорости не существовало, и маятниковых часов не было, а свободное падение тел происходит очень быстро.

### Научный метод Галилея

Сначала Галилей применил свою идею *мысленных экспериментов* и нашел способ замены очень быстрого падения тела медленным скатыванием его по желобу. Вот как это было сделано.

Вначале он проводил *реальные эксперименты* по изучению движения по наклонной плоскости. Для этого он брал длинный желоб, выстланный пергаментом, и пускал по нему бронзовый шарик. Скорость движения шарика по желобу при маленьком

СХЕМА 2



наклоне изменяется значительно медленнее, чем при свободном падении, если наклон желоба небольшой.

Теперь Галилей уже мог подсчитать время движения шарика, за которое он проходит разные пути по желобу. Он брал большое ведро, в дне которого сделано маленькое отверстие (схема 2). При закрытом отверстии Галилей наливал в ведро воду. Когда шарик начинал движение по желобу, Галилей открывал отверстие, и из ведра начинала медленно вытекать вода. Когда шарик проходил нужное расстояние, отверстие закрывалось, а масса вытекшей воды определялась взвешиванием.

Так как количество вытекшей воды можно считать пропорциональным времени ее вытекания, если отверстие маленькое, то по этому количеству можно определять время. Далее Галилею помогают интуиция и сила научного метода исследования. Из двух вариантов возможной зависимости скорости он интуитивно останавливается на первом: *скорость увеличивается прямо пропорционально времени движения.*

Из этого предположения, которое Галилей не мог проверить экспериментально, он математически вывел следствие: *путь должен быть пропорционален квадрату времени.*

Для доказательства Галилей поступил следующим образом (рис. 26). Путь, пройденный телом за время  $t_0$ , можно определить как площадь треугольника

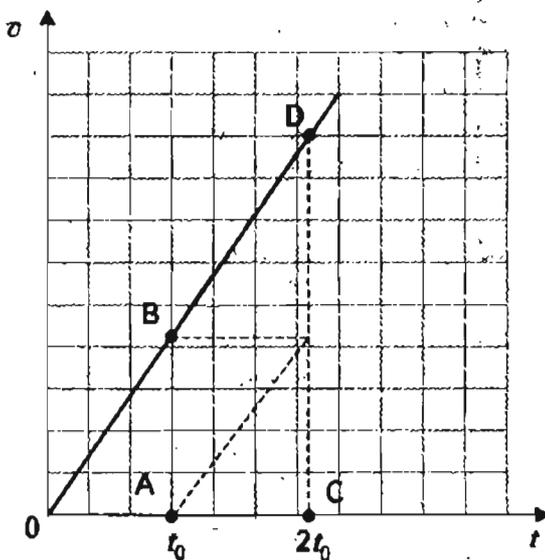


Рис. 26. Метод Галилея. Если трудно проверить гипотезу, то можно проверить следствие из нее

ка  $ABO$ . Пусть время увеличилось в два раза. Путь, пройденный телом за время  $2t_0$ , равен площади треугольника  $OCD$ . А эта площадь в  $4 = 2^2$  раза больше, чем площадь треугольника  $ABO$ . За время  $3t_0$  будет пройден путь в  $9 = 3^2$  раза больше, чем за время  $t_0$ . Если предположить, что скорость *пропорциональна времени*, то путь оказывается *пропорционален квадрату времени движения.*

На результатах реального эксперимента Галилей провел рассуждения — *мысленный эксперимент*: свободное падение тела под действием силы тяжести есть движение по наклонной плоскости с углом наклона  $90^\circ$ . Поэтому при таком падении *путь пропорционален квадрату времени, а скорость пропорциональна времени движения.*

*Экспериментальное исследование*

**Свободное падение**

Цель работы: прямая проверка гипотезы Г. Галилея.

Современные способы исследования позволяют непосредственно ответить на вопросы, поставленные Галилеем о зависимости скорости от времени и пути и зависимости пути от времени при свободном падении. Например можно воспользоваться стробоскопическим методом.

Он заключается в следующем. В затемненной комнате устанавливается фотоаппарат с открытым на все время процесса затвором, а движущееся тело освещается яркими вспышками света от специальной (стробоскопической) лампы. Каждая вспышка длится около  $\frac{1}{1000}$  секунды.

Вспышки повторяются с заранее заданной частотой.

При получении снимков часто применяют совершенный способ уменьшения трения. В пустотелую направляющую с одного конца нагнетается сжатый воздух, который выходит через многочисленные маленькие отверстия, сделанные в поверхности направляющей. Под давлением воздуха тело приподнимается примерно на 0,1 мм над поверхностью направляющей. Таким образом, действие силы тяжести на предмет оказывается скомпенсированным. Когда такому предмету сообщается начальная скорость, он сохраняет ее.

На рис. 27 приведено изображение, созданное на основе стробоскопической фотографии свободно падающего тела. Вспышки лампы следовали с интервалом  $t_0 = \frac{1}{30}$  с.

Измерьте скорости шарика в шести точках: А, В, С, D, E. Постройте графики зависимости: пути от времени, скорости от пути, скорости от времени.

Для приблизительного определения скорости в любой из точек необходимо измерить расстояние, пройденное телом за время  $2t_0 = 2 \cdot \frac{1}{30} \text{ с} = \frac{1}{15} \text{ с}$ . Это значение состоит из времени, равного  $(\frac{1}{30})$  секунды, в течении которого тело двигалось до точки, и времени, равного  $(\frac{1}{30})$  секунды, в течении которого тело двигалось — после. Расстояние для точки А равно  $l = 129 \text{ мм}$ . Скорость в точке А равна:

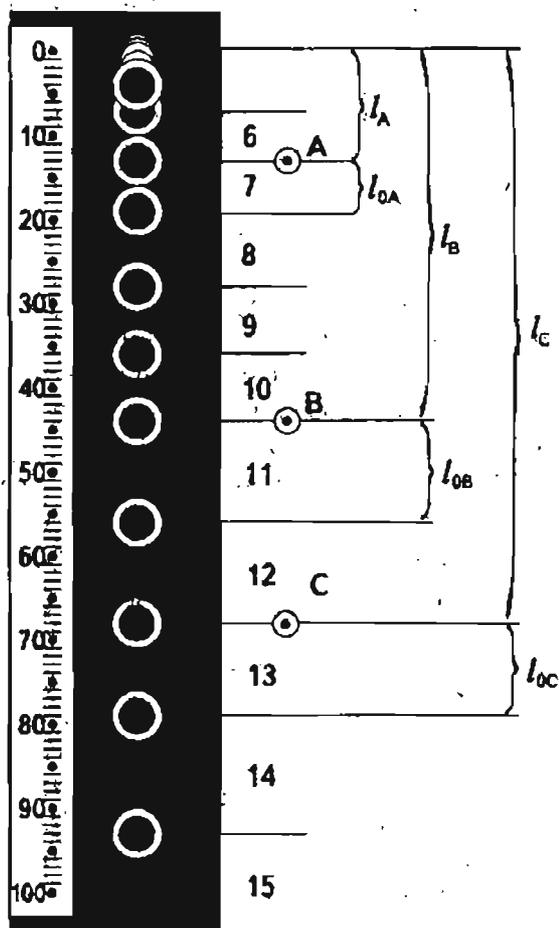


Рис. 27. Изображение стробоскопической фотографии

$$v_A = \frac{129 \text{ мм}}{\frac{1}{15} \text{ с}} = 1935 \frac{\text{мм}}{\text{с}} = 1,9 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Помните, что при работе со стробоскопической фотографией необходимо оценить ее масштаб. Линейка, помещенная рядом с падающим шариком, имеет длину  $1 \text{ м} = 1000 \text{ мм}$ .

Измерьте длину  $L$  (в мм) ее изображения. Тогда отношение:  $M = \frac{1000 \text{ мм}}{L}$  и будет масштабом. Любой отрезок, измеренный на фотографии, необходимо увеличить в  $M$  раз, чтобы узнать его действительную величину.

Примерный вариант таблицы для записи результатов эксперимента приведен ниже.

Таблица. Результаты измерений

Масштаб $M = \frac{(1000 \text{ мм})}{(L \text{ мм})}$						
Положения шарика	0	A	B	C	D	E
Время движения $t = \frac{1}{30} n, \text{ с}$	0	$\frac{1}{30} \cdot 6 = 0,2$				
Путь $l_n$ (мм), проходимый шариком за время $2t_0 = 2 \cdot \frac{1}{30} = \frac{1}{15}, \text{ с}$	0	129				
Мгновенная скорость $v = \frac{l_n}{2 \cdot t_0}, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$	0	$1935 \frac{\text{мм}}{\text{с}} = 1,9 \frac{\text{м}}{\text{с}}$				
Путь, пройденный за время $t = \frac{1}{30} n$						

Постройте графики зависимости модуля скорости и пути от времени.

### 3. ИЗМЕРЕНИЕ — ОСНОВА ЭКСПЕРИМЕНТА (УРОВЕНЬ В)

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

#### Вопрос 1

Почему на уроках физики уделяется большое внимание измерениям?

Одна из особенностей физики как науки о природе — это измерение физических величин. Только на основе измерений физических величин при описании процессов, происходящих в природе, можно перейти от качественных характеристик к количественным.

Например законы равноускоренного движения тел одним из первых изучил Г. Галилей, исследуя экспериментально зависимость пути, пройденного шаром, от времени движения.

Без измерения нельзя сделать обоснованного заключения о проверяемой гипотезе.

По поводу всякой гипотезы может быть сделан один из трех выводов:

- а) гипотеза неправильна и отвергается;
- б) гипотеза правильна и принимается;
- в) данных для суждения о степени достоверности гипотезы недостаточно, вопрос о ее правильности остается открытым.

Выбор одного из этих вариантов возможен только на основе измерений.

#### Вопрос 2

Что называется измерением?

Измерить какую-либо физическую величину — это значит *сравнить ее с однородной величиной, принятой за единицу измерения (найти значение физической величины), указать степень приближения найденного значения к истинному.*

#### Вопрос 3

Как определяется степень приближения найденного значения к истинному?

Для этого используются границы **абсолютной и относительной** погрешностей.

Интервал, который достоверно содержит истинное значение измеряемой физической величины, называется **интервалом достоверных значений величины**. Половина его значения называется **границей**



Рис. 28

**абсолютной погрешности  $\Delta X$** . Граница погрешности показывает, на сколько неизвестное истинное значение измеряемой величины может отклоняться от ее значения, полученного в результате измерений (рис. 29).

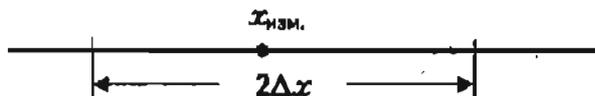


Рис. 29. Интервал достоверных значений

Использование понятия «граница погрешности измерения» вместо понятия «погрешность измерения»  $|\delta| = |X - a|$ , где  $X$  — результат измерения,  $a$  — истинное значение, связано с тем, что истинные значения физических величин остаются неизвестными, поэтому неизвестны и значения погрешностей измерений.

В отличие от погрешности измерений границу погрешностей измерений физической величины можно определить, зная характеристики применяемых приборов и методов измерений.

Граница абсолютной погрешности не в полной мере характеризует измерение. Пусть, например, в результате измерений установлено, что длина стола равна  $l = (100 \pm 1)$  см, а толщина его крышки  $d = (2 \pm 1)$  см. Хотя граница абсолютной погрешности измерений в этих двух случаях одинакова, по житейски понятно, что в первом случае качество измерения выше. Это интуитивно угадываемое качество измерений характеризуется понятием *границы относительной погрешности*.

Границей относительной погрешности измерения называется отношение границы абсолютной погрешности  $\Delta X$  к значению  $X$  измеряемой величины:

$$\epsilon_x = \frac{\Delta X}{X}$$

Граница относительной погрешности может быть выражена в процентах:  $\epsilon = \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\%$ .

#### Вопрос 4

Нельзя ли при завершении измерений указать лишь численное значение измеряемой величины и не вычислять границы погрешностей?

При проведении физических исследований нельзя исключить оценку погрешностей измерений.

Рассмотрим пример. Пусть путь, пройденный телом за 1 с и 2 с соответственно равнялся 5 м и 20 м. Сравнив отношения (2:1) и (2:5), можно сделать предположение, что путь пропорционален квадрату времени ( $2^2 = 4$ ). Однако вывод о справедливости такой гипотезы был бы правильным при соответствующей погрешности.

Пусть время измерено с погрешностью 1 с, а расстояние — с погрешностью 1 м. Из рис. 30 ясно, что вывод о справедливости гипотезы можно сделать, только уменьшив погрешность измерения времени.

Если погрешность уменьшить до 0,2 с, то вывод о справедливости гипотезы был бы достоверным, а

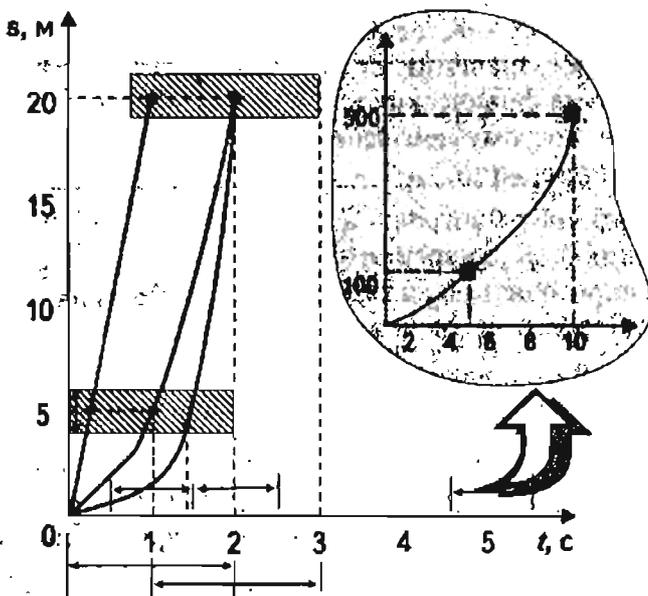


Рис. 30. Грубые измерения не позволяют установить справедливость или ложность гипотезы

если погрешность равнялась бы 0,5 с, то погрешность еще велика для подтверждения гипотезы.

Часто вам придется измерять величины, действительные значения которых известны.

Действительные значения — в десятки раз более точные, по сравнению с полученными вами. Они приводятся в таблицах. Без знания погрешности измерений нельзя убедиться в достоверности измерений.

Измерения таких величин проведены достоверно, если известное значение принадлежит интервалу  $[X_{изм} \pm \Delta X]$ . Можно также построить интервал  $[X_0 \pm \Delta X]$  ( $X_0$  — известное значение) и проверить, принадлежит ли ему число, полученное в эксперименте (рис. 31).

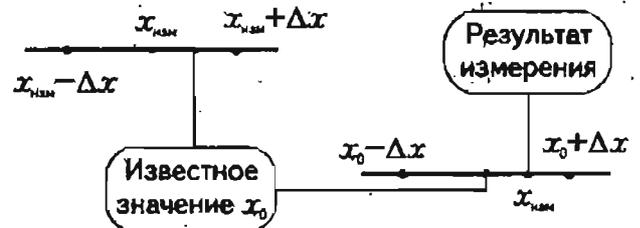


Рис. 31. Двумя способами можно убедиться в достоверности измерения известных величин

Иногда вам придется проверять уже известные законы. Только после вычисления погрешностей вы сможете ответить, достоверен ли проведенный эксперимент.

Пусть закон записан в виде равенства:  $A = B$ . Эксперимент подтверждает закон, если интервалы  $[A \pm \Delta A]$  и  $[B \pm \Delta B]$  имеют общие точки (рис. 32).

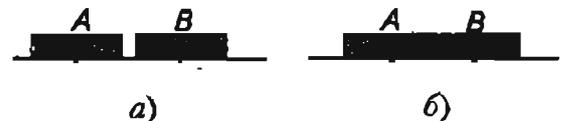


Рис. 32. Эксперимент не подтверждает закон  $A = B$  (а), закон справедлив (б)

#### Вопрос 5

Мне кажется, что если закон сформулирован в виде зависимости (функции) одной величины от другой, то убедиться в его достоверности можно и без оценки погрешности.

Из ответа на вопрос 4 уже ясно, что и в этом случае нельзя обойтись без оценки погрешностей.

Пусть исследуется зависимость функции  $y$  от аргумента  $x$ . При измерении мы получаем не точку с

координатами  $x$  и  $y$ , а прямоугольник со сторонами  $2\Delta x$  и  $2\Delta y$  (рис. 33).

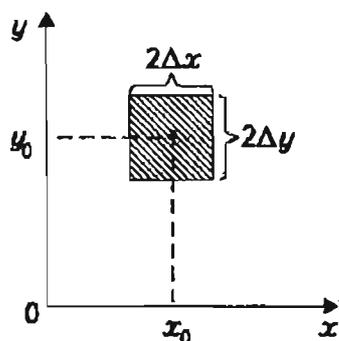


Рис. 33. В результате совместных измерений величин  $x$  и  $y$  получен прямоугольник со сторонами  $2\Delta x$  и  $2\Delta y$

Вместо плавных линий, к которым вы привыкли на уроках математики, получаются полосы, верхний и нижний края которых касаются этих прямоугольников.

Отсюда видно, что при построении графиков по результатам измерений у нас нет оснований соединять точки, а необходимо проводить плавную кривую вблизи построенных точек (рис. 34).

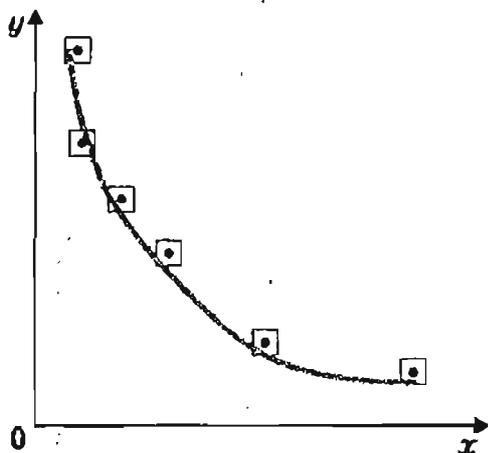


Рис. 34. Как строить график по результатам эксперимента

Следует хорошо понимать, что в результате измерений вы получаете точки, а график — это уже ваше представление о функциональной связи между величинами, которые вы измеряли. В большинстве случаев в лабораторных работах, которые будут выполняться, необходимо еще до проведения эксперимента четко представлять вид той функции, ко-

торую вы изучаете, характер графика, который необходимо построить.

Вопрос 6

Каковы же требования к выполнению графиков в лабораторных работах по физике?

Требования к графикам:

1. Графики строят только на миллиметровой бумаге.
2. Общепринято по горизонтальной оси откладывать величину, изменение которой является причиной изменения той, которая отложена по вертикальной оси.
3. Шкала должна легко читаться, поэтому одна клетка масштабной сетки должна соответствовать удобному числу: 1; 2; 5; 10.
4. На оси следует обязательно указывать обозначение и единицу измерения величины (рис. 35 а). Удобно, чтобы около меток шкалы стояли числа из интервала [1, 10]. Поэтому ось, изображенную на рис. 35 а, лучше представить в другом виде (рис. 35 б). Если числа, стоящие около меток, очень большие, то лучше вынести множитель (рис. 35 в).

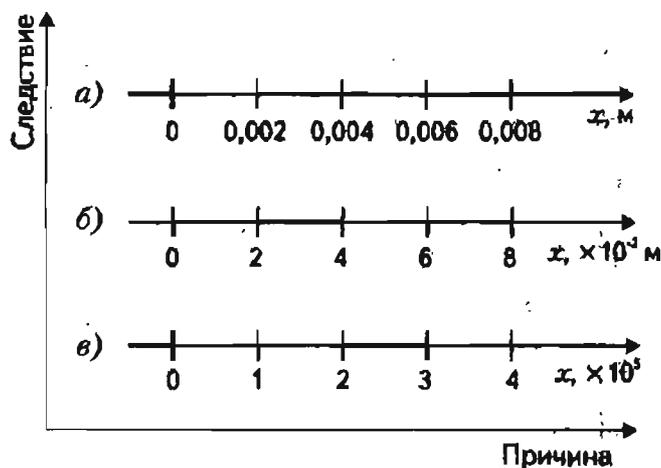


Рис. 35. Выбор масштаба по осям при построении графиков

5. Масштабы осей выбираются независимо друг от друга, однако следует помнить, что наиболее нагляден наклон графика, близкий к  $45^\circ$ .

Вопрос 7

В домашней задаче мне необходимо было построить график зависимости скорости от времени:

$$v = 5, 10, 15, 20 \pm 1 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$t = 0,50; 1,00; 1,50; 2,00 \pm 0,01 \text{ с.}$$

Если следовать вашим рекомендациям в выборе масштаба с учетом погрешностей, то график будет иметь вид, изображенный на рис. 36 а.

Причина такого расположения графика связана с тем, что погрешности измерения скорости и времени не согласованы друг с другом.

Например, в момент  $t = 2,0$  с относительная погрешность измерения времени равна  $\epsilon_t = (0,01) \cdot 100\% = 1\%$ , а погрешность измерения скорости в этот же момент в 5 раз больше:  $\epsilon_v = \frac{1}{20} 100\% = 5\%$ . Поэтому в условиях данной задачи можно пренебречь погрешностью измерения времени. С учетом сказанного увеличим масштаб по вертикальной оси и уменьшим — по горизонтальной. График будет иметь вид, изображенный на рис. 36 б.

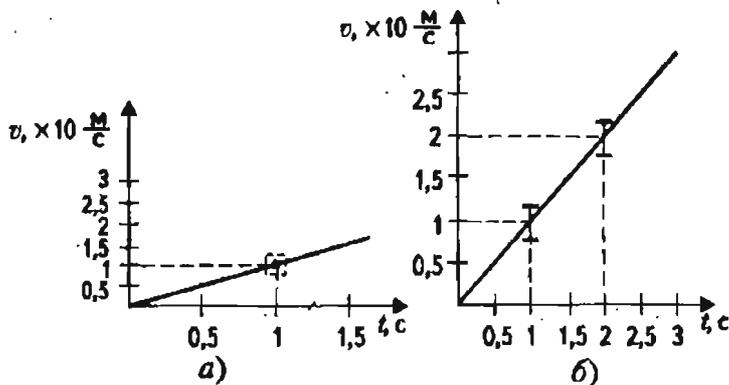


Рис. 36

### Вопрос 8

Следует ли из ответов на вопрос 4, что табличные данные («действительные значения») также имеют погрешности?

Погрешность табличных данных не превосходит половины разряда последней цифры. Например, в таблице записано, что плотность ртути  $\rho = 13,6 \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$ .

Последняя цифра «6» находится в разряде десятых. Следовательно, ее погрешность не превосходит значения:  $(0,1 : 2) = 0,05$ .

Таким образом составители таблицы, записавшие:  $\rho = 13,6 \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$ , гарантируют, что неизвестное истинное значение плотности ртути находится в интервале  $\rho = (13,60 \pm 0,05) \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$  или:

$$13,55 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} < \rho_{\text{истин.}} < 13,65 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

### Вопрос 9

Почему надо записывать  $13,60 \pm 0,05$ , а не  $13,6 \pm 0,05$ ?

Существует правило записи приближенных значений: число и его погрешность должны иметь одинаковое число десятичных знаков.

### Вопрос 10

С использованием микрокалькулятора был вычислен объем баллона медицинского термометра. Масса ртути в термометре равна 4,5 г. На дисплее калькулятора оказалось число:

$$V = m : \rho = (4,5 \text{ г}) : \left(13,6 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right) = 0,3308823 \text{ см}^3.$$

Верно ли, что погрешность, с которой был вычислен объем, равна половине разряда последней цифры, т.е.:  $0,0000001 : 2 = 0,00000005 \text{ (см}^3\text{)}$ ?

Число 0,00000005 — это погрешность, с которой программа калькулятора округляет приближенный результат деления двух чисел: 4,5 и 13,6. Эти числа калькулятор «воспринимает» как числа 4,5000000 и 13,600000, соответственно. Погрешность «0,00000005» не имеет никакого отношения к погрешности объема. При округлении числа 0,3308823 можно спокойно отбросить все числа после запятой, начиная со второго разряда, и написать:  $0,3 \text{ см}^3$ .

Этот пример показывает, что без знания погрешностей нельзя верно проводить вычисления.

### Вопрос 11

Напомним правила работы с приближенными числами.

Простейшие из этих правил следующие.

1. В разности и сумме сохраняют столько десятичных знаков, сколько их содержится в том из данных, где десятичных знаков меньше.

$$\text{Пример: } m_1 = 4,5 \text{ г, } m_2 = 3,23 \text{ г;}$$

$$m = m_1 + m_2 = 4,5 \text{ г} + 3,23 \text{ г} = 7,73 \text{ г} = 7,7 \text{ г.}$$

2. В произведении и частном сохраняют столько значащих цифр, сколько их имеется в том из данных, где значащих цифр меньше.

Напомним следующие термины.

Верной цифрой называют такую, погрешность которой не превосходит половины единицы ее разряда.

**Сомнительная цифра** — следующая за *верной*.

**Значащие цифры** числа — цифры, начиная с первой слева, отличной от нуля, и кончая последней, за точность которой еще можно поручиться.

Примеры:

23,47 — четыре значащих цифры.

0,0065 — две значащих цифры.

18,003 — пять значащих цифр.

Вернемся к правилу о делении и умножении приближенных чисел. Найдем значение произведения:  $23,47 \cdot 0,0065$ . В соответствии с правилом, мы должны сохранить две значащих цифры и записать:

$$23,47 \cdot 0,0065 = 0,15.$$

### Вопрос 12

Как же найти верную цифру?

Рассмотрим ответ на этот вопрос на примере. Пусть  $x = 11,8367 \pm 0,024$ . Округляем погрешность с избытком до 0,03. Следовательно,  $x = 11,8367 \pm 0,03$ .

Погрешность сравниваем с половиной разряда, в котором находится цифра «3»:  $0,03 < 0,05$ .

Но 0,05 — это половина разряда десятых:  $\left(\frac{0,1}{2}\right) = 0,05$ .

*Верная цифра находится в разряде десятых.*

Другими словами: в числе 11,8367 цифра «8» в разряде десятых *верная*, цифра «3» в разряде сотых — сомнительна, цифры «6» и «7» — неверны.

Итак, следует записать:  $11,83 \pm 0,03$ .

### Вопрос 13

Почему мы не записали:  $11,84 \pm 0,03$ ? Ведь «6» (в числе 11,8367) после цифры «3» больше 5.

Дело в том, что цифры «6» и «7» — неверны. Они просто отбрасываются.

### Вопрос 14

А можно записать  $x = 5391 \pm 28$ ?

Нет. Во-первых, округлим погрешность до одной значащей цифры с избытком:

$$x = 5391 \pm 30.$$

Это означает, что цифра десятков в числе 5391 сомнительна, а цифра единиц — неверна. Правильная запись:

$$x = 5390 \pm 30.$$

И при  $x = 5398 \pm 30$  верной будет запись:

$$x = 5390 \pm 30.$$

### Вопрос 15

Сколько значащих цифр оставлять в числе, которым записана погрешность?

Чаще всего погрешность записывается с одной значащей цифрой.

Почему? Первая левая цифра погрешности определяет сомнительную цифру результата. Вторая цифра погрешности ничего не добавляет к точности результата.

Поэтому для записи приближенного числа достаточно одной значащей цифры в погрешности, ведь число записывается не более чем одной сомнительной цифрой.

Пример:  $27,43 \pm 0,18 \rightarrow 27,43 \pm 0,2 \rightarrow 27,4 \pm 0,2$ .  
 $5391 \pm 28 \rightarrow 5391 \pm 30 \rightarrow 5390 \pm 30$ .

### Вопрос 16

Из ваших рассуждений получается, что при записи погрешности никогда не пишут две значащие цифры?

Погрешность записывается с двумя значащими цифрами, если первая из них — цифра 1 или если вторая — цифра 5.

### Вопрос 17

Каковы правила округления погрешностей?

Вы никогда не ошибетесь, если округлите погрешность с завышением (по избытку):

$$\Delta = 0,024 \approx 0,03.$$

Вместе с тем, погрешность можно округлить с недостатком, если первая из отбрасываемых цифр меньше 3. Это связано с тем, что метод границ дает наибольшее значение погрешности, тогда как действительное значение погрешности чаще всего меньше.

### Вопрос 18

Является ли 0 значащим, если он стоит в конце числа?

Если мы написали  $1 \text{ кг} = 1000 \text{ г}$ , то три нуля — значащие. Пусть мы измерили отрезок и получили  $l = 72 \text{ см}$ . Затем, не производя измерений более точным прибором, запишем:  $l = 720 \text{ мм}$ .

Если в числе 720 считать 0 значащим, то погрешность равна 0,5 мм, тогда как в действительности погрешность измерения отрезка равна 0,5 см, т. е. в 10 раз больше. Таким образом, 0 в числе 720 не является значащим.

## Вопрос 19

При решении задачи необходимо было  $S = 24,5$  км записать в единицах СИ, т. е. в метрах. Как это сделать правильно?

Запись  $S = 24,5$  км означает, что абсолютная погрешность равна  $0,05$  км =  $50$  м (все числа верные). Если записать  $S = 24500$  м, то это будет означать, что погрешность равна  $0,5$  м. Таким образом, эта запись ошибочна. Можно написать:  $S = 24,5 \cdot 10^3$  м. Но общепринято писать так, чтобы коэффициент перед  $10^n$  был из промежутка  $[1; 10]$ . Следует записать:  $S = 2,45 \cdot 10^4$  м.

## Вопрос 20

Поясните на примерах, как пользоваться математическими таблицами, таблицами физических величин.

В математических таблицах приближенные значения записаны только верными цифрами. Можно добавить: в таблицах физических величин, в табличных данных, приводимых в текстах учебников и в задачах, приближенные значения записаны только верными цифрами.

Приведем примеры. В таблице V на с. 35 «Математических таблиц» В. М. Брадиса можно найти:  $\sqrt{1,2} = 1,095$ . Если вычислить с помощью микрокалькулятора, то  $\sqrt{1,2} = 1,0954451$ . Погрешность приближенного значения, приведенного в таблице, не превосходит  $0,0005$ . (Сравните:  $1,095$  и  $1,0954451$ ).

В учебнике физики приведено значение массы электрона  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  г. В таблице №13 (стр. 29) «Справочника по физике и технике» можно найти действительное значение массы электрона:

$$m = 9,10953 \cdot 10^{-31} \text{ кг.}$$

Сравнение чисел  $9,1$  и  $9,10953$  показывает, что погрешность числа  $9,1$  не превосходит  $0,05$ . Вместе с тем, число  $9,10953 \cdot 10^{-31}$  кг — приближенное, его абсолютная погрешность не превосходит  $0,000005 \cdot 10^{-31}$  кг.

## Вопрос 21

Когда и могу быть уверен, что умею пользоваться таблицами физических величин?

Это значит следующее. Вы можете:

- 1) отыскать необходимую таблицу в учебнике, задачнике, справочнике;
- 2) найти в ней необходимое приближенное значение с наименованием единиц измерения;

- 3) определить абсолютную погрешность и записать границы интервала, внутри которого находится точное значение;
- 4) определить относительную погрешность;
- 5) ответить на вопрос: каков физический смысл данной величины?

Приведем пример. Учитель дает задание: найти в сборнике задач значение плотности ртути. В таблице «Жидкости» вы находите строку «Ртуть» и столбец «Плотность». Выписываете число:  $13,6$ . Теперь надо вернуться к заголовку столбца. Там указаны

единицы измерения:  $10^3 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right)$ ;  $\rho = 13,6 \cdot 10^3 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right)$ .

Интервал, внутри которого находится действительное значение плотности, имеет вид:

$$13,55 \cdot 10^3 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right) < \rho < 13,65 \cdot 10^3 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right).$$

Относительная погрешность равна:

$$\epsilon = \frac{0,05 \cdot 10^3}{13,60 \cdot 10^3} \cdot 100\% = 0,4\%$$

### Виды и методы физических измерений. Причины погрешностей. Измерение времени и расстояний.

## Вопрос 1

Какой смысл вкладывается в понятие «вид измерения»?

Классификация измерений по видам связана с характером вычислительных операций, при помощи которых получают численное значение измеряемой величины.

Рассмотрим пример по измерению сопротивления проводника. Для получения численных значений силы тока и напряжения достаточно провести отсчет по соответствующим шкалам. Такие измерения называются **прямыми**.

Прямыми называют измерения, заключающиеся в отсчете показаний прибора либо в сравнении измеряемой величины с мерой. Простейшими примерами прямых измерений являются измерения длины линейкой (сравнение с мерой), температуры.

При определении численного значения сопротивления необходимо значения напряжения и тока ( $U$  и  $I$ ), полученные в результате прямых измерений, поделить друг на друга:  $R = \frac{U}{I}$ . Говорят, что значе-

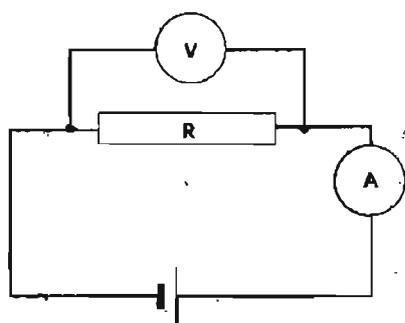


Рис. 37. Прямые и косвенные измерения

ние сопротивления получено в результате *косвенных* измерений.

**Косвенными** называют измерения, результат которых определяют на основании прямых измерений величин, связанных с измеряемой величиной известной зависимостью.

В лабораторной работе сопротивление можно было бы найти, построив график зависимости силы тока от напряжения. Убедившись, что сила тока прямо пропорциональна напряжению, можно найти сопротивление. В этом случае измерения называются *совместными*.

**Совместными** называют прямые или косвенные измерения двух или нескольких неодновременных величин, производимые одновременно с целью нахождения функциональной зависимости между ними.

При подготовке к лабораторной работе надо хорошо себе представить, каков вид измерений каждой физической величины. Для всех величин, значения которых находят в результате прямых измерений, необходимо знать приборы и меры.

Если величина получается как результат косвенных измерений, важно знать формулу, по которой она рассчитывается. При проведении совместных измерений очень полезно еще до измерений знать вид функции, которая экспериментально изучается.

## Вопрос 2

Каковы общие методы физических измерений?

Рассмотрим два метода сравнения масс тел (рис. 38). Пусть масса тележки № 1 неизвестна. В тележку № 2 будем добавлять гири до тех пор, пока после взаимодействия с неподвижной тележкой № 1 скорость тележки № 2 не обратится в нуль. Тогда мож-

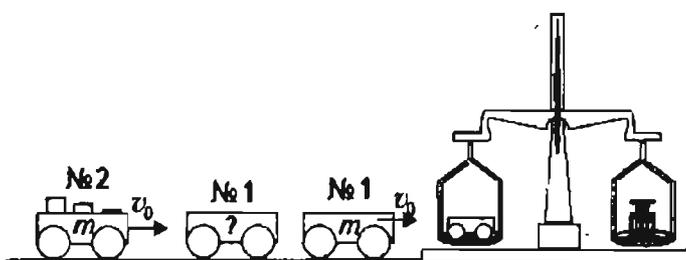


Рис. 38. Нулевой метод

но утверждать, что масса тележки № 1 равна массе тележки № 2.

Со вторым методом вы познакомились при изучении весов. Масса тележки равна массе гирь только при условии, если указатель весов совпадает с нулем.

При этих двух совершенно различных методах измерения используется один и тот же так называемый **0-метод** (нулевой метод).

Таким образом, метод измерения характеризуется некоторыми общими признаками, которые не зависят от того, какие физические величины, какими приборами или мерами измеряются, каков вид измерения.

Самых общих методов измерения совсем немного. Кроме 0-метода, который является одним из первых в истории развития техники точных измерений, наиболее распространенным является **метод непосредственной оценки**. Большинство прямых измерений осуществляются этим методом. Быстрота процесса измерения методом непосредственной оценки делает его незаменимым для практического использования.

Широко распространен **метод совпадений**. Этот метод характеризуется использованием совпадений отметок шкал или периодических сигналов.

На основе метода совпадений построен **нониус** штангенциркуля и ряда других приборов. Шкала нониуса штангенциркуля (рис. 39) имеет десять делений по 0,9 мм. Когда нулевая отметка шкалы нониуса окажется между отметками основной шкалы штангенциркуля, это будет означать, что к целому числу миллиметров следует прибавить некоторое число  $x$  десятых долей миллиметра ( $x \cdot 0,1$ ).

Для определения числа  $x$  находим отметку шкалы нониуса, совпадающую с отметкой основной шка-

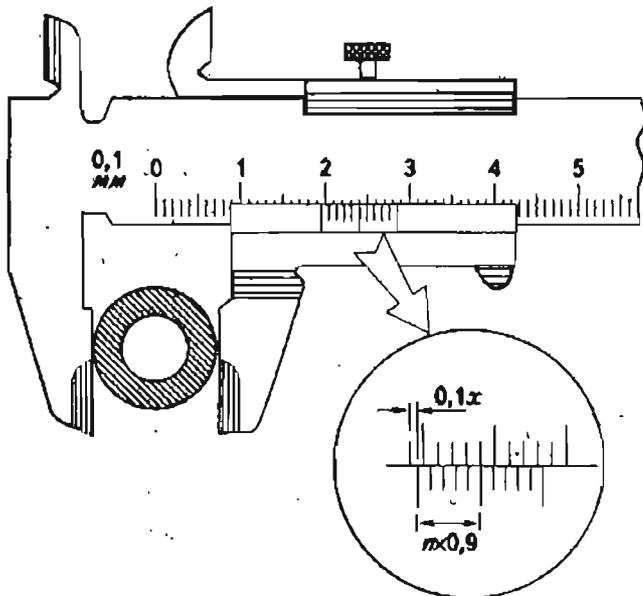


Рис. 39. Метод совпадений

лы. Пусть такой отметкой будет  $n$ -я отметка нониуса. Так как измеряемая дробная часть миллиметра  $0,1 \cdot x$  равна разности между целым числом миллиметров по основной шкале ( $n$  мм) и расстоянием по шкале нониуса от нулевой до совпадающей отметки, равного  $n \cdot 0,9$  мм, можно написать:

$$0,1 \cdot x = n - n \cdot 0,9 = 0,1 \cdot n \rightarrow x = n.$$

Следовательно, порядковый номер совпадающей отметки нониуса непосредственно дает число десятых долей миллиметра (рис. 39).

Метод совпадений лежит в основе использования стробоскопического эффекта (англ. *to strobe* — *посылать импульсы*) для целей измерений.

### Вопрос 3

Каковы причины появления погрешностей измерения? Как они классифицируются?

Погрешности измерений по причине их появления делятся на случайные, систематические и промахи.

При проведении с одинаковой тщательностью и в одинаковых условиях повторных измерений одной и той же величины мы получаем результаты измерений, которые отличаются друг от друга. Причины этих различий могут быть самыми разнообразными.

Например, часто нельзя обеспечить одинаковость условий при повторных испытаниях. Другими словами, причина — само изучаемое явление (рис. 40 а).

Измерительный прибор также является причиной того, что его показания оказываются разными в

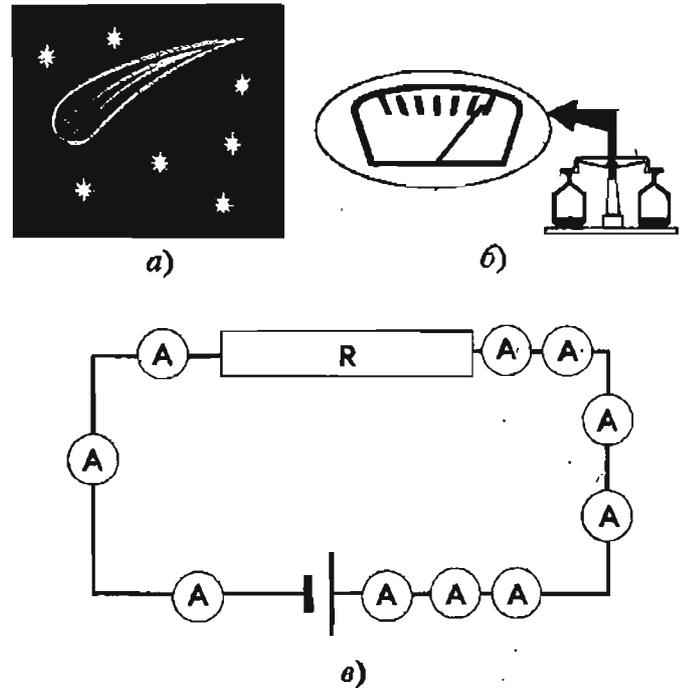


Рис. 40. Причины появления погрешностей

одинаковых условиях. Здесь возможны два варианта (рис. 40 б). Например при взвешивании одного и того же тела на одних и тех же весах вы будете получать разные значения массы, т. к. нельзя проконтролировать трение в оси и т. д. Другой вариант возникает, если вы гарантируете одинаковость величины, однако приборы одного и того же типа и класса точности показывают разные значения.

Иногда условия производства данного вида продукции приводят к тому, что количественные характеристики одинаковых изделий не являются вполне одинаковыми. Например, автомат по изготовлению шариковых узлов для авторучек выдает узлы незначительно различающихся диаметров.

Погрешности, возникающие по перечисленным причинам, называются случайными. Случайными называют погрешности, изменяющиеся случайным образом при повторных измерениях.

Вернемся к опыту, изображенному на рис. 40 в. Представим себе, что сопротивление резистора  $R = 1$  Ом, а напряжение, создаваемое источником тока, равно 1 В. Через резистор пойдет ток силой 1 А. Вместе с тем, если опыт проделать с лабораторными амперметрами, то хотя они и будут показывать разные значения силы тока (из-за случайных оши-

бок), однако эти показания будут близки к  $I_0 = 0,6$  А, а не  $I = 1,0$  А.

Почему же возникла такая большая разница:

$$\Delta = 1,0 - 0,6 = 0,4 \text{ (А)?}$$

Это произошло потому, что амперметр имеет сопротивление порядка 0,07 Ом, а все 10 амперметров имеют суммарное сопротивление 0,7 Ом.

Представим себе, что мы не знаем этого; тогда мы считали бы, что сила тока в цепи 0,6 А, и тем самым допустили бы так называемую **систематическую ошибку**. Очевидно, что при использовании амперметра эта ошибка присутствует всегда. Она приводит к тому, что сила тока оказывается несколько меньше, чем она была до процесса измерения. Эту ошибку можно учесть.

*Любой способ измерения имеет систематическую ошибку. Эти ошибки следует хорошо себе представлять и учитывать, если они достаточно велики.*

**Промахи** — это погрешности, которые существенно превышают систематические и случайные погрешности. *Причинами промахов обычно являются ошибки наблюдателя, неисправность средств измерений.*

Существуют требования к проведению опытов, которые необходимо выполнять, чтобы избежать промахов.

- 1) Если условия проведения опытов позволяют, никогда не ограничивайтесь одним измерением. Промах чаще всего возникает при выполнении первого опыта.
- 2) Часто экспериментальная работа такова, что провести измерение хотя бы два раза нельзя. В этом случае особенно тщательно готовьтесь к измерению.
- 3) Если в серии опытов присутствует промах, его исключают из рассмотрения с обязательным указанием типа: «Опыт №... я не учитывал. Считаю его промахом, так как...».

#### В о п р о с 4

Ранее упоминалось, что для механики важнейшее значение имеет измерение расстояний и времени. Каковы методы их измерений?

Методы измерения расстояний и времени представлены на рис. 41 и схеме 3.



Рис. 41

#### Измерение расстояний

Для измерения сравнительно небольших расстояний и размеров тел используют рулетку, метр, линейку (металлическую, деревянную, матерчатую).

Если измеряемые размеры и расстояния малы и требуется большая точность, то измерения проводят штангенциркулем, микрометром.

При измерении больших расстояний широко применяются триангуляция, метод параллакса и радиолокация.

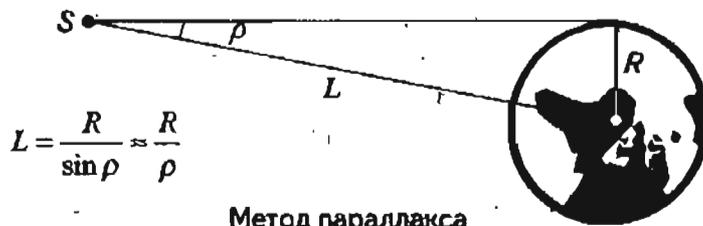
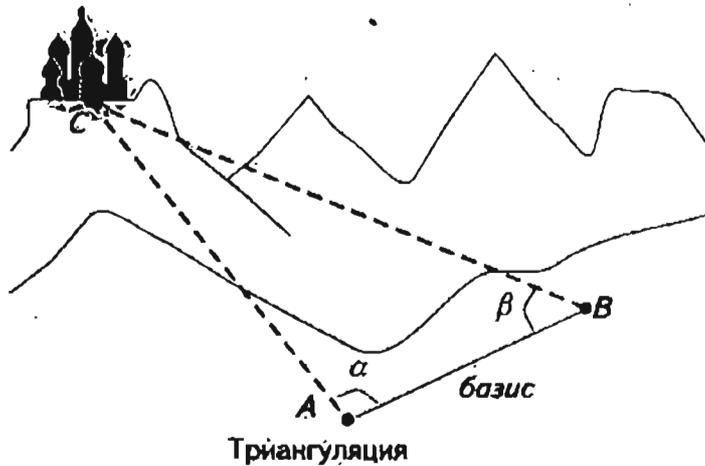
#### Триангуляция

«Триангулус» — треугольник (лат.). Пусть нам необходимо измерить расстояние до недоступного предмета от точки А у подножия горы до точки С на ее вершине. Для этого от точки А «откладывают» произвольный отрезок АВ и измеряют его длину (базис). При этом получают (мысленно) треугольник АВС.

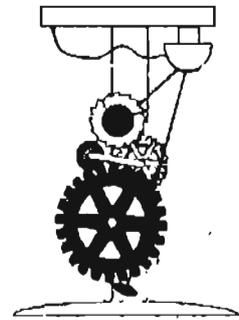
Для обозначения на местности вершин треугольника строят силуэтные сооружения, называемые

## СХЕМА 3

## Измерение расстояний



## Измерение времени



Механизм часов, построенных Галилеем



Электронные часы



Атомные часы

геодезическими знаками, или сигналами. Для нахождения искомого расстояния  $AC$  необходимо знать в общем случае (если треугольник косоугольный) два угла —  $\alpha$  и  $\beta$ . Если же угол  $\alpha$  прямой, то достаточно измерить один угол  $\beta$ . Затем находим  $AC$  — либо по формуле  $AC = AB \cdot \operatorname{tg} \beta$ , либо из теоремы синусов:

$$\frac{AC}{\sin \beta} = \frac{AB}{\sin(180^\circ - \alpha - \beta)}$$

## Метод параллакса

Это способ определения расстояний до небесных тел, в основе которого лежит явление параллактического смещения.

Параллактическое смещение — это изменение направления на предмет при смещении наблюдателя. Метод параллакса — это, по существу, тот же метод триангуляции. При определении расстояний до небесных тел — Луны, Солнца и других планет Солнечной системы в качестве базиса используют радиус Земли (схема 3).

Наблюдают положение тела Солнечной системы одновременно из двух обсерваторий. Из двух выбранных точек определяют направления на наблюдаемый объект, что позволяет найти угол  $\rho$ , под которым с этого объекта был бы виден радиус Земли. Этот угол называется горизонтальным параллак-

сом и равен параллактическому смещению наблюдаемого объекта.

Измеряемое расстояние:  $L = \frac{R}{\sin \rho}$ . Например, параллакс Луны — 57', параллакс Солнца — 8,8". При измерении расстояния до ближайших к нам звезд в качестве базиса берут расстояние от Земли до Солнца.

### Локация

Расстояние до объекта определяют по времени  $\Delta t$ , через которое сигнал, посланный источником, возвращается к источнику сигнала, отразившись от объекта:  $L = \Delta t \frac{V}{2}$ , где  $V$  — скорость распространения сигнала.

В зависимости от рода сигнала различают звуковую, световую и радиолокацию. Время посылки и возвращения сигнала фиксируется специальными приборами.

**Ультразвуковой локацией** пользуются моряки при определении расстояния до подводных и надводных скал и айсбергов, до морского дна.

Поскольку звуковые волны в воздухе быстро затухают, для определения расстояний до самолетов, спутников, кораблей используют радиосигналы — радиолокацию.

Время  $\Delta t$  здесь очень мало, так как скорость распространения электромагнитного сигнала  $c$  равна  $300\,000 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ . С помощью радиолокации измерены расстояния от Земли до Луны и до ряда планет Солнечной системы.

В последние годы созданы мощные источники оптически направленного сигнала — лазеры, с помощью излучения которых производятся геодезические измерения на поверхности Земли, а также локация поверхности Луны — светолокация.

### Измерение времени

Для измерения времени используют периодические или равномерно протекающие процессы. При этом исходят из равномерности хода времени: относительная скорость протекания всех процессов в природе остается неизменной на протяжении всей истории человечества, т. е. она одна и та же и вчера, и сегодня, и завтра.

Время измеряют при помощи часов. История часов уходит в глубокую древность. Первыми были солнечные часы. Затем появились песочные часы: они измеряли время, за которое песок из верхнего сосуда пересыпался в нижний. Аналогичный принцип был положен в основу водяных и огненных часов. В первом случае время измерялось по скорости вытекания воды, во втором — по скорости сгорания свечи, шнура, деревянной палочки и т. д.

Примерно в IX–X вв. были изобретены первые механические часы. В России первые механические часы были установлены на одной из башен московского Кремля монахом Лазарем Сербиным в 1404 г. Механизм этих часов состоял из вала с намотанной на него веревкой. К концу веревки прикреплялась гири, при опускании которой вал вращался.

Чтобы опускание гири и вращение вала были равномерными, использовался маятник — груз, подвешенный на тонком стержне. Периодичность качаний маятника обеспечивала периодичность хода часов.

Маятник с помощью анкера соединялся с зубьями так называемого хвостового колеса таким образом, что за одно колебание маятника колесо поворачивалось на один зуб. Хвостовое колесо соединялось со стрелками часов и приводило их в движение по циферблату. Позднее веревку с грузом заменили пружиной, а маятник — маленьким колесом, балансом, совершавшим крутильные колебания.

Изобретателем современных механических часов считают Х. Гюйгенса, но следует заметить, что создание современных механических часов стало возможным только после того как Галилей установил, что период колебаний маятника при малых амплитудах не зависит от амплитуды колебаний.

Точность механических часов достаточно высокая:  $\approx 0,0001$  секунды за сутки, но и она не всегда оказывается достаточной. Поиски более точных часов привели к появлению электронных кварцевых часов, молекулярных часов, атомных часов, квантовых часов и, наконец, радиоактивных часов.

В электронных часах используется обратный пьезоэлектрический эффект. При подведении к противоположным поверхностям кварцевой пластины переменного электрического напряжения определенной частоты возникают механические колебания кристалла со строго постоянной частотой. Переменное напряжение вырабатывает генератор,

кристалл кварца играет роль маятника, вместо шестерен механических часов используются различные электронные схемы. Стрелки часов вращает электродвигатель. Точность хода — 1 мкс за сутки. Недостаток кварцевых часов — зависимость частоты колебаний кварца от температуры.

В молекулярных и атомных часах используется свойство молекул и атомов поглощать и излучать энергию строго определенной частоты. Это очень точные часы. Так, точность хода атомных часов составляет  $\pm 1$  с за 10 000 лет.

Период излучения атома цезия взят в качестве нового эталона времени. В системе измерения времени в «атомных» секундах (введена в нашей стране с 1 января 1972 г.) в качестве 1 секунды принято время, равное 9 192 631 770 периодов излучения атома цезия.

В квантовых часах (в них используются электромагнитные колебания водородного квантового генератора) погрешность составляет 1 с за 100 000 лет.

Очень большие промежутки времени — тысячи и миллионы лет — измеряют с помощью так называемых радиоактивных часов. Основой таких «часов» является процесс радиоактивного распада ядер химических элементов. Скорость такого распада для различных элементов различна. Так, период полураспада — это время, в течение которого число атомов химического элемента уменьшается в два раза:  ${}_{238}\text{U} \approx 4,5$  млрд. лет;  ${}_{235}\text{U} \approx 700$  млн. лет;  ${}_{14}\text{C} \approx 5500$  лет;  $\text{Ra} \approx 3,82$  суток.

Зная период полураспада, по соотношению оставшихся элементов в исследуемом образце можно определить его возраст.

## Прямые однократные измерения. Косвенные измерения

### Вопрос 1

Предположим, что стрелка указателя прибора совпала со штрихом шкалы. Как в этом случае определить границу погрешности измерения?

В этом случае погрешность измерения не превосходит основную ( $\Delta_{\text{осн}}$ ) приборную погрешность данного средства измерения (рис. 42).

Пример результата измерения:

$$x = x_0 \pm \Delta x,$$

$$x = 0,7 \pm 0,1;$$

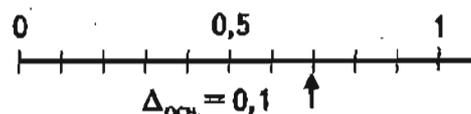


Рис. 42. Определение погрешности при совпадении указателя со штрихом шкалы

$$\epsilon_x = \frac{0,1}{0,7} 100\% = 15\%.$$

### Вопрос 2

Как определить основную погрешность средства измерения?

Основные погрешности приборов указаны в их паспортах, инструкциях по использованию. Основные погрешности средств измерений, с которыми вам предстоит работать, приведены в табл. 6.

Для электроизмерительных приборов в качестве меры их основной погрешности используется понятие **класс точности**. Класс точности часто указан в виде цифры, обведенной кружком, на шкале прибора (рис. 43)

Класс точности  $\gamma$  показывает, сколько процентов от предела измерения составляет основная погрешность прибора. На рис. 43 показана шкала прибора, класс точности которого  $\gamma = 4$ . Следовательно, основная погрешность равна:

$$\Delta_{\text{осн}} = (6 \cdot 4) : 100 = 0,24 \approx 0,25.$$

Обратите внимание: число 0,25 — это граница погрешности измерения при любом положении указателя при его совпадении со штрихом шкалы. Для рис. 43 можно записать:  $x = 3,00 \pm 0,25$ .

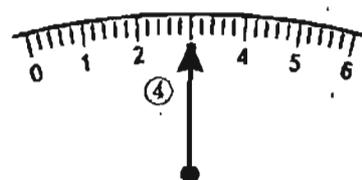


Рис. 43. Класс точности

### Вопрос 3

Как найти погрешность измерения, если стрелка прибора не совпадает со штрихом шкалы?

При снятии показания прибора мы округляем результат до ближайшего деления шкалы. Но при этом к погрешности прибора  $\Delta_{\text{приб}}$  следует прибавить погрешность отсчета  $\Delta_{\text{отсч}}$ .

**Погрешность отсчета** — это погрешность, которая возникает при определении положения указателя по отношению к шкале. Специальные исследования показали, что при ширине деления не менее, чем 1–2 мм, погрешность отсчета минимальна и равна половине деления. Это значит, что вы всегда надежно можете определить штрих шкалы, ближний к указателю.

Но определить на глаз десятые доли очень сложно. Только опытные экспериментаторы умеют определять на глаз десятые доли деления, и то с погрешностью 0,2 деления. Мы будем считать, что погрешность отсчета не превосходит половины цены деления:

$$\Delta_{\text{отсч}} = \frac{C}{2}$$

Пусть прибор на рис. 44 имеет основную погрешность  $\Delta_{\text{осн}} = 0,1$ ; погрешность отсчета  $\Delta_{\text{отсч}} = 0,05$ . Погрешность измерения  $\Delta x = 0,15$ .

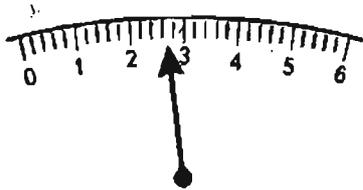


Рис. 44. Погрешность отсчета

Чаще всего встречаются следующие варианты соотношения между погрешностями отсчета, основной погрешностью и ценой деления  $C$ :

а)  $\Delta_{\text{осн}} = \frac{C}{2}$ ;  $\Delta_{\text{отсч}} = \frac{C}{2}$ ;  $\Delta x = C$ .

б)  $\Delta_{\text{осн}} = C$ ;  $\Delta_{\text{отсч}} = \frac{C}{2}$ ;  $\Delta x = 1,5 C$ .

в)  $\Delta_{\text{осн}} > 2 C$ ;  $\Delta_{\text{отсч}} = \frac{C}{2}$ ;  $\Delta x = 2 C$  (можно пренебречь  $\Delta_{\text{отсч}}$  по сравнению с  $2 C$ ).

**Вопрос 4**

Всегда ли погрешность отсчета равна  $\frac{C}{2}$ ?

Нет. Часто погрешность отсчета превосходит  $\frac{C}{2}$ .

Пусть вы измеряете длину карандаша линейкой с миллиметровыми делениями (рис. 45). Ясно, что нельзя «на глаз» выполнить отсчет точнее радиуса закругления:  $2\Delta_{\text{отсч}} = 3 \text{ мм}$ ;  $\Delta_{\text{отсч}} = 1,5 \text{ мм}$ .

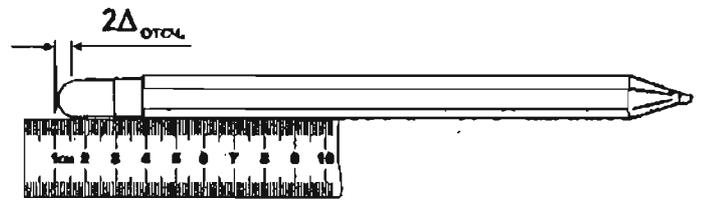


Рис. 45

Если  $\Delta_{\text{осн}} = 0,5 \text{ мм}$ , то погрешность измерения определяется погрешностью отсчета:

$$\Delta x = \Delta_{\text{отсч}} + \Delta_{\text{осн}} = 1,5 \text{ мм} + 0,5 \text{ мм} = 2 \text{ мм}$$

(можно пренебречь погрешностью прибора по сравнению с погрешностью отсчета).

**Вопрос 5**

Как определить погрешность отсчета при использовании весов? Они же не имеют шкалы...

При использовании весов возникает частный случай погрешности отсчета — погрешность подбора гирь. Эта погрешность равна половине массы минимальной гири, которая вызывает заметное отклонение весов от положения равновесия, или массы минимальной гири, находящейся на чашке.

Пусть вы взвешивали груз из набора для лабораторных работ по механике. Когда у вас на чашке была гиря с номинальным значением 100 г, то груз «перевешивал». Вы положили гирю 1 г, и теперь гири (100 + 1) г имеют большую массу, чем масса груза. Погрешность подбора гирь равна  $\pm 0,5 \text{ г}$ . Вы решили уменьшить погрешность подбора гирь. Весы оказались в равновесии при наборе: 100г; 200 мг; 100 мг. Погрешность подбора гирь равна:  $100 \text{ мг} : 2 = 50 \text{ мг}$ .

**Вопрос 6**

А если окажется, что случайно при наборе 100 г + 50 г весы в равновесии. Чему же равна погрешность? Можно ли считать, что она равна  $(50 \text{ г} : 2) = 25 \text{ г}$ ?

В этом случае следует найти гирю наименьшей массы, которая нарушит равновесие весов. Половина ее массы и равна погрешности подбора гирь.

**Вопрос 7**

Как определить погрешность при измерении массы на весах?

Здесь необходимо учитывать основную погрешность весов, которая зависит от нагрузки, основную погрешность гирь и учесть еще погрешность

подбора гирь. Последняя погрешность аналогична погрешности отсчета и равна половине значения массы наименьшей гири, выводящей весы из равновесия. Таким образом, при прямом измерении массы на весах, граница погрешности измерений равна сумме:

$$\Delta = \Delta_{\text{весов}} + \Delta_{\text{всех гирь}} + \Delta_{\text{подбора гирь}}$$

Рассмотрим пример по оценке погрешности при взвешивании. Пусть весы находились в равновесии при наборе гирь:

$$m = 100 \text{ г} + 200 \text{ мг} + 100 \text{ мг}.$$

Погрешность весов при нагрузке 100 г определяем по их паспорту. Для школьных весов она равна  $\Delta_{\text{пр}} = 120 \text{ мг}$ . Погрешность подбора гирь равна  $\Delta = 50 \text{ мг}$ .

#### Вопрос 8

Как находят погрешность косвенных измерений?

При проведении косвенных измерений сначала по специальным формулам, приведенным в табл. 5, определяют относительную погрешность, а уже затем — абсолютную.

#### Вопрос 9

Приводим пример определения погрешности косвенных измерений.

Рассмотрим пример измерения плотности:

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

В результате прямых измерений массы и объема были получены следующие результаты:

$$V = (11 \pm 1) \text{ см}^3; m = (15,0 \pm 0,5) \text{ г}.$$

1. Сначала определяем плотность:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{15 \text{ г}}{11 \text{ см}^3} \approx 1,36 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

2. Так как  $\rho = \frac{m}{V}$ , то в табл. 5 находим формулу расчета относительной погрешности:

$$\epsilon_{\rho} = \epsilon_m + \epsilon_v = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{11} + \frac{0,5}{15,0} \approx 50,124;$$

$$\epsilon_{\rho} = 13\%.$$

3. Находим абсолютную погрешность:

$$\epsilon_{\rho} = \frac{\Delta \rho}{\rho} \rightarrow \Delta \rho = \rho \cdot \epsilon_{\rho};$$

$$\Delta \rho = 1,36 \cdot 0,124 \approx 0,2 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

4. Записываем ответ:

$$\rho = (1,3 \pm 0,2) \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

### Случайные погрешности (уровень В)

#### Вопрос 1

В каких случаях приходится проводить многократные измерения?

Одно наблюдение проводят только в особых случаях, когда нет возможности его повторить. Если в двух наблюдениях получаются одинаковые результаты, то можно прекратить дальнейшие измерения, очевидно, что приборы имеют большие основные погрешности и разброс не проявляется.

Однако, если при двух измерениях получаются разные результаты, то о причинах этого ничего сказать нельзя. Ведь первое измерение часто сопровождается промахом. При трех наблюдениях возможность суждения о причинах разброса иногда существует, но только при особо удачной серии данных. Так, серия (12,1; 12,8; 12,4) позволяет считать разброс случайным, но в столь же вероятной серии (12,1; 12,4; 12,8) можно подозревать постепенное увеличение измеряемой величины. То же относится к серии (12,1; 11,9; 12,8), где можно предполагать наличие промаха (11,9).

При четырех—пяти наблюдениях случайное появление монотонной последовательности или промаха уже достаточно маловероятно. Значение четыре—пять и примем в качестве минимально допустимого числа наблюдений для лабораторной работы, если мы хотим провести достоверные измерения при наличии случайных погрешностей.

#### Вопрос 2

Что же принимается за результат измерений при проведении многократных измерений?

Ответ на поставленный вопрос сложен, потому что и результаты измерений, и погрешности измере-

ний управляются вероятностными законами. При наличии случайных погрешностей, сколько бы измерений одной и той же величины ни было проведено, нельзя предсказать точно, каким будет результат следующего опыта.

Вместе с тем, если например проведена серия из 100 опытов, то теория погрешностей может предсказать интервал, в котором окажется результат следующего опыта. Теория погрешностей доказывает, что наиболее надежным окончательным результатом серии равнозначных измерений является их среднее арифметическое значение:

$$x_{cp} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}$$

где  $x_i$  — результаты отдельных опытов, а  $n$  — число опытов.

**В о п р о с 3**

Как определить границу случайной погрешности?

Легко понять, что мерой абсолютной погрешности среднего арифметического не может служить среднее значение суммы отклонений отдельных результатов от среднего:

$$\frac{(x_1 - x_{cp}) + (x_2 - x_{cp}) + \dots + (x_n - x_{cp})}{n}$$

поскольку оно всегда равно нулю:

$$\begin{aligned} & \frac{(x_1 - x_{cp}) + (x_2 - x_{cp}) + \dots + (x_n - x_{cp})}{n} = \\ & = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} - \frac{x_{cp} + x_{cp} + \dots + x_{cp}}{n} = 0. \end{aligned}$$

Причина равенства нулю суммы отклонений от среднего состоит в одинаковой частоте наблюдаемых положительных и отрицательных отклонений от среднего.

Понятно, что если взять модули отклонений от среднего  $|x_n - x_{cp}|$ , то нуль не будет получаться. На основе использования модулей  $|x_n - x_{cp}|$  можно вычислить случайную погрешность. Для этого найдется средняя абсолютная погрешность:

$$\Delta x_{cp} = \frac{|x_1 - x_{cp}| + |x_2 - x_{cp}| + \dots + |x_n - x_{cp}|}{n}$$

**В о п р о с 4**

Можно ли считать, что истинное значение  $x_{ист}$  находится в интервале:  $x_{cp} - \Delta x_{cp} < x_{ист} < x_{cp} + \Delta x_{cp}$ ?

Ответ на этот вопрос зависит от числа опытов. Специальные исследования показали что если  $x_{cp}$  и  $\Delta x_{cp}$  найдены по результатам пяти опытов, то только в интервале  $[x_{cp} \pm 3\Delta x_{cp}]$  истинное значение находится с вероятностью, близкой к единице. Другими словами, при  $n = 5$ ,  $\Delta x_{случ.} = 3\Delta x_{cp}$ .

Те же специальные исследования показали что при  $n = 7-8$ ,  $\Delta x_{случ.} = 2\Delta x_{cp}$ , а при  $n = 10$ ,  $\Delta x_{случ.} = \Delta x_{cp}$ .

**В о п р о с 5**

Приведите пример обработки результатов многократных измерений.

Время некоторого процесса измерялось секундомером с погрешностью  $\Delta = 0,01$  с и получены следующие пять результатов (в секундах):

- 89,56;      89,52;      89,54;
- 89,50;      89,60.

Определить границу случайной погрешности.

1. Определим среднее значение времени:

$$\tau_{cp} = (89,56 + 89,52 + 89,54 + 89,50 + 89,60) : 5 = 89,54.$$

2. Составим таблицу:

Опыт	$\tau$	$\tau_{cp}$	$ \Delta\tau $	$\Delta\tau_{cp}$
1	89,56	89,54	0,02	0,028 = 0,03
2	89,52		0,02	
3	89,54		0	
4	89,50		0,04	
5	89,60		0,06	

3. Граница случайной погрешности не превосходит:

$$\Delta\tau_{случ.} = 3\Delta\tau_{cp} = 0,09.$$

4. Общая погрешность измерения  $\Delta t$  складывается из погрешности секундомера, равной 0,01 и случайной погрешности, равной 0,09. Ясно, что погрешностью секундомера (0,01) можно пренебречь по сравнению со случайной (0,09).

Итак,  $\Delta t = 0,09$  с. Результат измерения:

$$89,54 - 0,09 \leq t \leq 89,54 + 0,09 \Rightarrow 89,45 \leq t \leq 89,63.$$

Относительная погрешность измерения:

$$\epsilon_{\tau} = \frac{\Delta\tau}{\tau_{cp}} = \frac{0,09}{89,63} 100\% = 0,1\%.$$

Таблица 5. Формулы расчета погрешностей

Вид функции	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность	Вид функции	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
$z = x \pm y$	$\Delta(x \pm y) = \Delta x + \Delta y$	$\epsilon_z = \frac{\Delta x + \Delta y}{x + y}$	$z = \frac{x^n y^m}{z^k}$	$\Delta z = z\epsilon_z$	$\epsilon_z = n\epsilon_x + m\epsilon_y + k\epsilon_z$
$z = \frac{x}{y}$ $z = xy$	$\Delta\left(\frac{x}{y}\right) = \frac{x\Delta y + y\Delta x}{y^2}$ $\Delta(xy) = x\Delta y + y\Delta x$	$\epsilon_z = \epsilon_x + \epsilon_y$			
$z = x^n$ $z = \sqrt[n]{x}$	$\Delta z = nx^{n-1} \cdot \Delta x$ $\Delta z = \frac{\Delta x}{n\sqrt[n]{x^{n-1}}}$	$\epsilon_z = \frac{1}{n}\epsilon_x$ $\epsilon_z = n\epsilon_x$	$z = \frac{A \pm B}{A}$	$\Delta z = z\epsilon_z$	$\epsilon_z = \epsilon_A + \epsilon_B$

## Вопрос 6

Можно ли уменьшить погрешность измерения времени в приведенном примере?

Да, это можно сделать.

Так как  $\Delta t = \Delta_{\text{осн(секундомера)}} + \Delta t_{\text{случ}}$ , то  $\Delta t$  не может стать меньше  $\Delta_{\text{осн(секундомера)}}$ , равной 0,01 и может быть уменьшена только за счет уменьшения  $\Delta t_{\text{случ}}$ , т. е. за счет увеличения числа опытов. Например, при увеличении числа опытов до десяти  $\Delta t_{\text{случ}}$  будет равна  $\Delta t_{\text{случ}}$ .

Самостоятельная  
работа

1. Укажите, какие из приведенных ниже значений чисел точные, а какие — приближенные.

а) Плотность воды при 4°C равна  $1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

б) Скорость звука при 0°C равна  $332 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

в) Относительная масса кислорода равна 16.

2. Определите абсолютные и относительные погрешности приближенных чисел, приведенных в задании 1.

3. Брусек имеет размеры  $10 \times 20 \times 40$  мм. Абсолютная погрешность каждого размера равна 0,5 мм. Какова относительная погрешность каждого размера?

4. Не изменяя точности чисел, запишите:

170 мм — в сантиметрах;

250 мл — в литрах.

5. Запишите в стандартной форме следующие приближенные числа:

плотность азота —  $0,00125 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ ;

гелия —  $0,00018 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ ;

водорода —  $0,00009 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ .

6. Результат лабораторной работы был записан так:

$$\rho = (7,48 \pm 0,2) \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

Запишите результат верными цифрами.

7. Масса внутреннего сосуда калориметра равна 44 г, а с водой — 230,7 г. Какова масса воды в сосуде?

8. Произведите отсчет по шкале штангенциркуля (рис. 46) и запишите результат измерения.

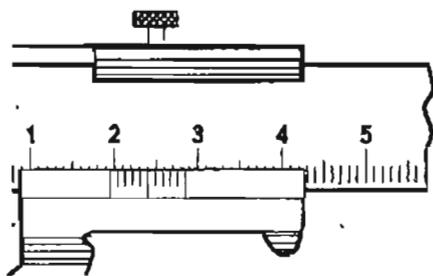


Рис. 46

9. С помощью микрометра длина тела измерялась пять раз. Результаты занесены в таблицу.

№ п/п	1	2	3	4	5
$l, \text{мм}$	5,97	6,00	6,02	5,96	5,99

Определите границу абсолютной погрешности измерения, если основная погрешность микрометра равна  $4 \cdot 10^{-6}$  м.

Для уменьшения случайной погрешности провели еще пять измерений.

№ п/п	6	7	8	9	10
$l, \text{мм}$	6,01	5,94	6,02	6,03	5,97

Определите погрешность среднего значения по результатам всех десяти измерений.

*Контрольная работа*

1. Табличное значение плотности золота равно

$19,3 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ . Найдите абсолютную и относительную погрешности этого значения.

2. Длина отрезка при измерении с точностью до десятых долей дециметра равна 1,8 дм, при измерении с точностью до миллиметра — 180 мм. Во сколько раз второе измерение точнее первого?

3. Следующие числа выразите в единицах СИ и подсчитайте число незначащих нулей:

а. 12 км; 0,050 км<sup>2</sup>; 50,0 т;  
 б. 1,60 МН; 6,60 кВ.

4. Скорость света в вакууме равна  $299792,5 \pm 0,4 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ ,

а скорость звука в воздухе —  $331,63 \pm 0,04 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Что измерено с большей точностью?

5. Число  $3000 \pm 100$  разные ученики записали так:  $3,0 \cdot 10^3$ ;  $3 \cdot 10^3$ ;  $30 \cdot 10^2$ . Верна ли каждая из этих записей?

6. На тело вдоль одной прямой действуют четыре силы:

$$F_1 = 7,5 \text{ кН}; \quad F_2 = -0,85 \text{ кН};$$

$$F_3 = 1,0 \text{ кН}; \quad F_4 = -10 \text{ кН}.$$

Найдите равнодействующую  $R$ .

7. В водоеме на глубине 10 м давление воды равно  $1,0 \cdot 10^5$  Па. Найдите общее давление на этой глубине, учитывая атмосферное давление.

8. Запишите результаты измерений длины стержней (рис. 47), если первый раз отсчет производили с точностью до 1 мм, а второй раз — до 1 см. Определите в каждом результате количество верных и сомнительных цифр. Измерение какого из стержней позволило получить результат с меньшей относительной погрешностью? Во сколько раз?

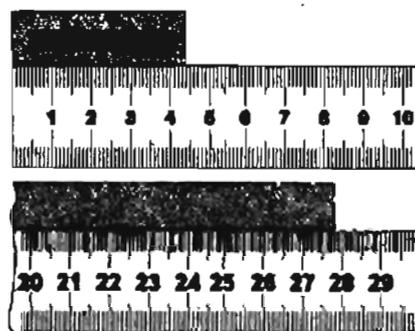


Рис. 47

9. При измерении атмосферного давления барометром-анероидом приборная погрешность составляет 3 мм рт. ст., возможная погрешность отсчета  $\pm 0,5$  мм рт. ст. и температурная погрешность  $\pm 1$  мм рт. ст. Какова полная погрешность измерения? Запишите результат измерения, если стрелка прибора установилась на отметке 756 мм.

*Творческие  
задания*

## Тормозной путь автомобиля

### Цель работы

Исследование зависимости тормозного пути от массы. Оценка случайной погрешности измерений.

### Выдвижение гипотезы

Сформулируйте правдоподобную, на ваш взгляд, гипотезу о зависимости тормозного пути при полной блокировке колес от массы автомобиля.

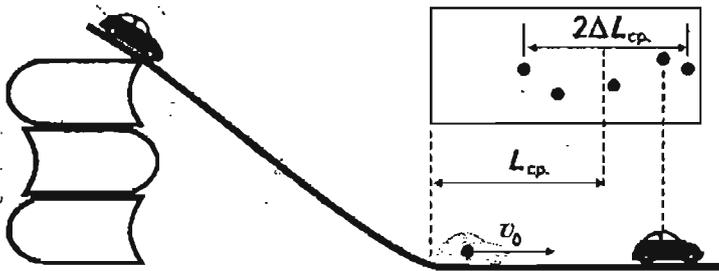


Рис. 48. Экспериментальная проверка зависимости тормозного пути от массы автомобиля

### Возможный вариант экспериментальной проверки

Соорудите разгонную горку, подобно показанной на рис. 48; смоделируйте автомобиль, движущийся с полностью заблокированными колесами. Моделью может служить игрушечный автомобиль или просто коробка.

Для двух моделей, значительно отличающихся по массе, оцените среднее значение тормозного пути  $l_{cp}$  по результатам пяти опытов; определите среднюю абсолютную погрешность  $\Delta l_{cp}$  и случайную погрешность. Для изменения массы моделей можно воспользоваться монетами.

При определении  $l_{cp}$  и  $\Delta l_{cp}$  можно вместо вычислений воспользоваться графическим приемом.

Отмечайте точкой каждое положение передних колес автомобиля. Расстояние от первой до последней точки равно  $L = 2\Delta l_{cp}$ . Среднее значение  $l_{cp}$  — это расстояние от начала торможения до середины отрезка  $L$ .

После оценки «на глаз» погрешности  $\Delta l_{cp}$  выберите необходимое средство измерения длины.

### Выводы

Отложите на числовой оси два интервала тормозных путей при различных массах и сделайте вывод.

# Кинематика

## Изучив эту тему,

- ♦ вы узнаете, что движение относительно; при свободном падении тела движутся с одинаковым ускорением; равномерное движение может быть ускоренным;
- ♦ поймете, что скорость и ускорение могут иметь разные направления, что нельзя исследовать движение без указания системы отсчета;
- ♦ научитесь анализировать движение различными способами, решать графические и расчетные задачи, выполнять тестовые задания, измерять скорость и ускорение

## Основные понятия:

Система отсчета ♦ Траектория ♦ Путь ♦ Перемещение ♦ Скорость ♦ Ускорение

## 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ КИНЕМАТИКИ

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

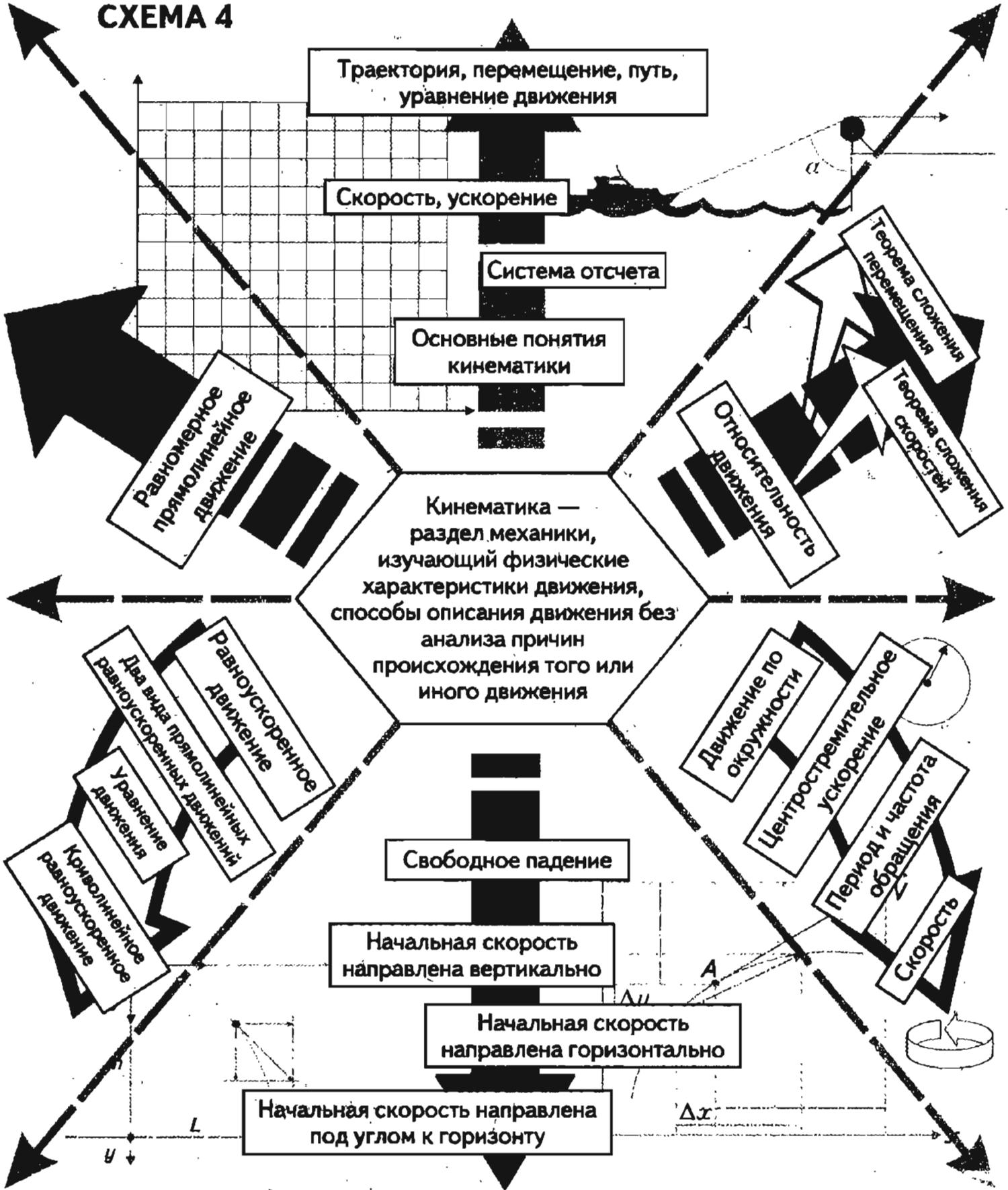
### Система отсчета

Механическое движение — это изменение положения тела относительно других тел с течением времени. Для изучения движения тел всегда выбирается специальное тело — тело отсчета.

С целью количественного описания движения с телом отсчета связывается система координат, которая, в зависимости от особенностей движения, состоит из одной оси ( $Ox$ ), двух ( $Ox, Oy$ ) или трех ( $Ox, Oy, Oz$ ).

Способ измерения времени — обязательный элемент, необходимый для анализа движения.

СХЕМА 4



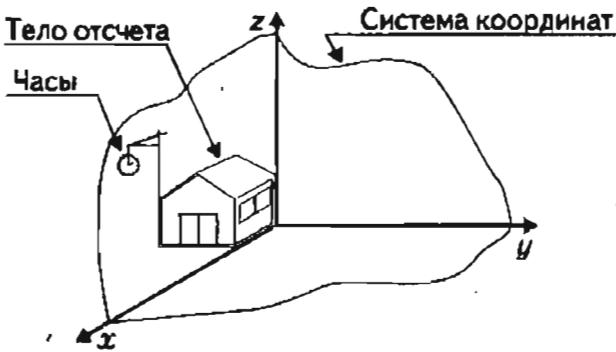


Рис. 49. Система отсчета

Таким образом, система отсчета включает: тело отсчета, систему координат, способ измерения времени (рис. 49).

**Траектория, путь, перемещение, координатные уравнения движения**

**Траектория** — линия, которая описывает любую точку тела (или тело, размеры которого значительно меньше расстояния, им проходимого).

**Перемещение**  $\vec{s}$  — вектор, соединяющий начальное положение тела с его последующим.

$|\vec{s}|$ ,  $s$  — модуль вектора перемещения. Единица измерения модуля вектора перемещения 1 метр.

**Путь**  $s$  — длина дуги (отрезка при прямолинейном движении) траектории между начальным и конечным положениями тела на ней с учетом и многократного прохождения им одного и того же участка.

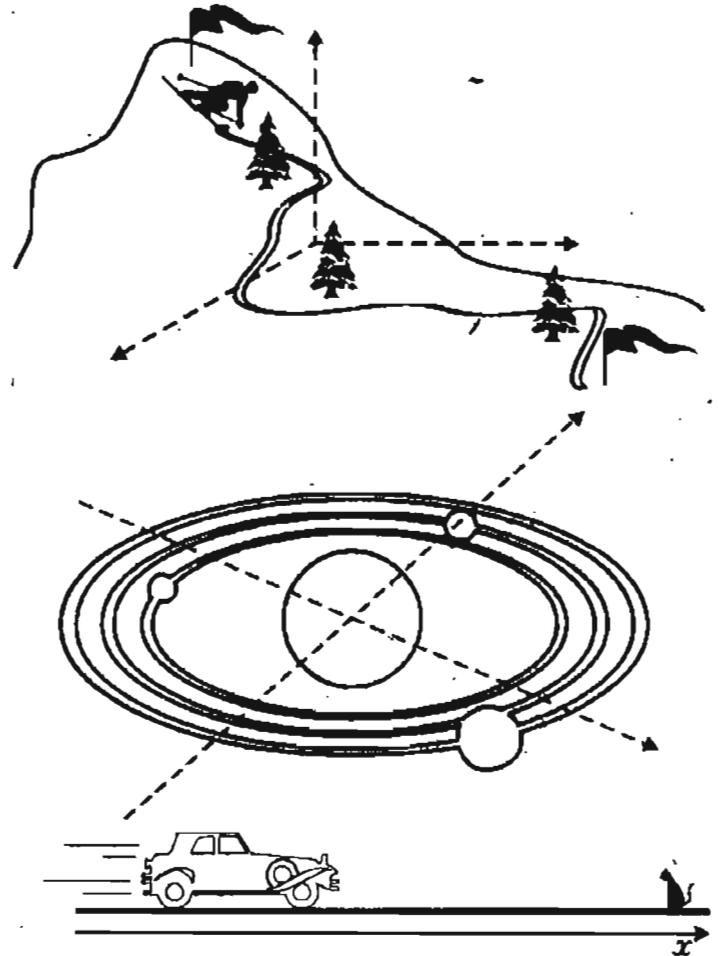


Рис. 51. Примеры движений

На рис. 52 мяч в момент броска занимал начальное положение (1), поднялся по вертикали на высоту 10 м относительно балкона (2) и упал на Землю (3).

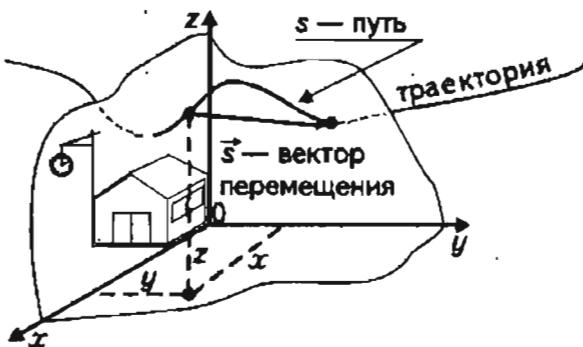


Рис. 50. Путь, перемещение, траектория

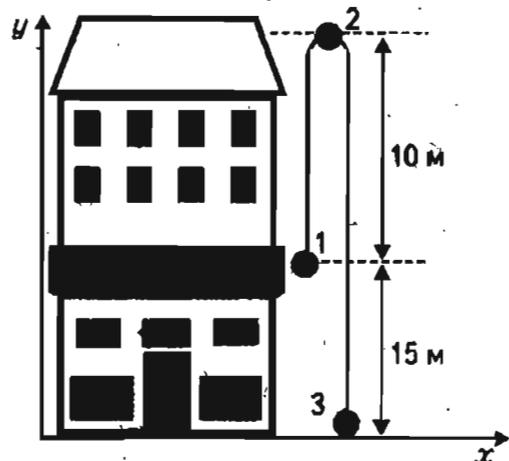


Рис. 52. Как определить путь?

Путь  $s = 10 \text{ м} + 10 \text{ м} + 15 \text{ м} = 35 \text{ м}$ . Модуль вектора перемещения  $s = 15 \text{ м}$ .

При движении тела координаты его изменяются с течением времени. Зависимость координат движущегося тела от времени называется **координатным уравнением движения**.

Для примера, представленного на рис. 52, движение описывается одним уравнением. Если начало координат находится в точке (3), то уравнение движения имеет вид:  $y = 10t - 5t^2$ , если тело бросили вверх со скоростью  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Скорость  $\vec{v}$  тела в данный момент времени называется **мгновенной скоростью**. Скорость — векторная физическая величина. Вектор  $\vec{v}$  направлен по касательной (рис. 53). Единица модуля скорости  $v$  равна  $1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

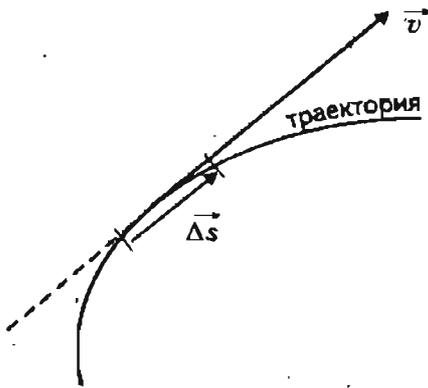


Рис. 53. Мгновенная скорость направлена по касательной

Для измерения модуля скорости необходимо измерить отношение  $\frac{|\Delta \vec{s}|}{\Delta t}$ , где  $|\Delta \vec{s}|$  — модуль достаточно малого перемещения за соответствующий промежуток времени  $\Delta t$ ; чем меньше  $\Delta \vec{s}$  и  $\Delta t$ , тем меньше отличие  $v$  от  $\frac{|\Delta \vec{s}|}{\Delta t}$ . Скоростью  $\vec{v}$ , следовательно, можно назвать отношение  $\frac{|\Delta \vec{s}|}{\Delta t}$  при  $\Delta t \rightarrow 0$ .

При движении тела его координаты изменяются (рис. 54). Так как в соответствии с теоремой Пифагора:

$$\Delta s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}, \text{ то}$$

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{\Delta t} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{\Delta t}\right)^2}$$

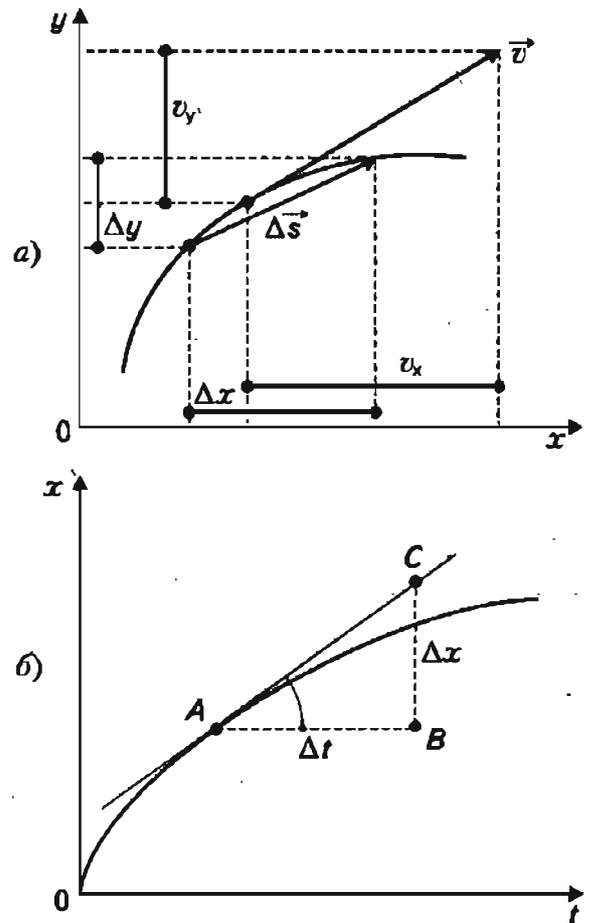


Рис. 54. Проекция векторов перемещения и скорости (а); зависимость  $x(t)$  — (б)

Обозначим для краткости  $\frac{\Delta x}{\Delta t}$  через  $v_x$ ,  $\frac{\Delta y}{\Delta t}$  через  $v_y$ .

Получим:  $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ ;  $v_x$  и  $v_y$  часто называются проекциями скоростей.

Координатные уравнения движения позволяют легко определить проекции скоростей. Достаточно провести касательную в точке А. Тогда отношение  $\frac{BC}{AB} = v_x$  (рис. 54, б).

Часто используются графики зависимости модуля скорости и проекции  $v_x$ ,  $v_y$  и  $v_z$  от времени.

Движение называется **ускоренным**, если изменяется с течением времени его скорость  $\vec{v}$ . Ускоренными оказываются любые движения, в которых изменяется либо модуль скорости  $v$ , либо направление вектора скорости  $\vec{v}$ . Тем более движение является ускоренным при изменении и модуля, и направления вектора скорости (рис. 55).

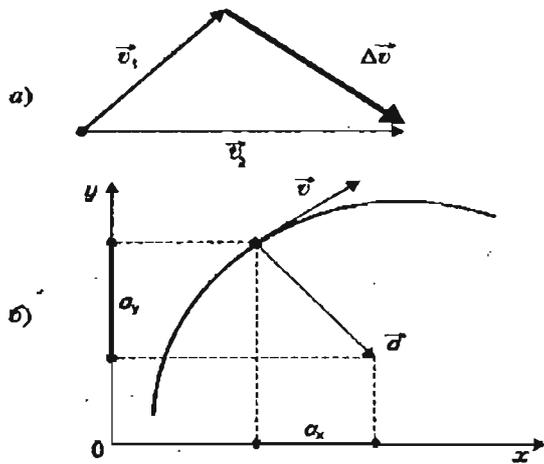


Рис. 55. Ускоренное движение

### Исследование движения тела с использованием стробоскопической фотографии

На рис. 57 представлена стробоскопическая фотография движения шарика, брошенного под углом  $27^\circ$  к горизонту. Промежуток времени между вспышками лампы стробоскопа равен  $t_0 = \frac{1}{30}$  с. Снимок выполнен на фоне линейки длиной 1 м.

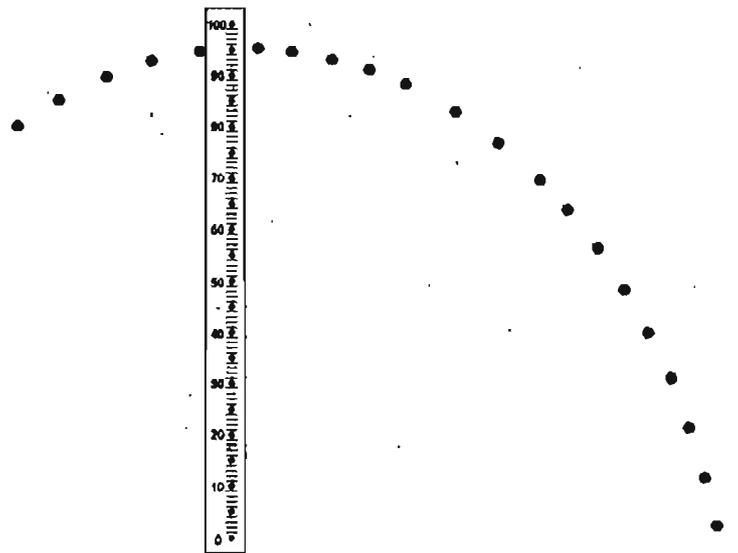


Рис. 57. Изображение стробоскопической фотографии

#### Указания к выполнению

1) Масштаб  $M$  фотографии:  $M = \frac{1000(\text{мм})}{A}$ , где  $A$  — длина в миллиметрах метровой линейки, изображенной на фотографии.

Если на фотографии был измерен любой отрезок длиной  $l$ , то его длина  $L$  в действительности равна  $L = l \cdot M$ .

2) Определите время движения шарика.

3) Измерьте путь  $s_1$ , пройденный шариком за время  $t_1 = \frac{1}{30} \cdot 10 \text{ с} = \frac{1}{3} \text{ с}$ , и путь  $s_2$ , пройденный шариком за время  $t_1 \leq t \leq t_2$ ,

где  $t_2 = \frac{1}{30} \cdot 20 \text{ с} = \frac{2}{3} \text{ с}$ .

Сравните  $s_1$  и  $s_2$  (рис. 58).

Для нахождения ускорения  $\vec{a}$  (рис. 56 а, б) определяют разность  $\Delta\vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$  за небольшой промежуток времени  $\Delta t$  ( $\Delta t \rightarrow 0$ ).

Ускорение равно:  $\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{\Delta t}$ .

Единица ускорения:  $1 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

Проекции вектора ускорения равны:

$$a_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t}; a_y = \frac{\Delta v_y}{\Delta t}.$$

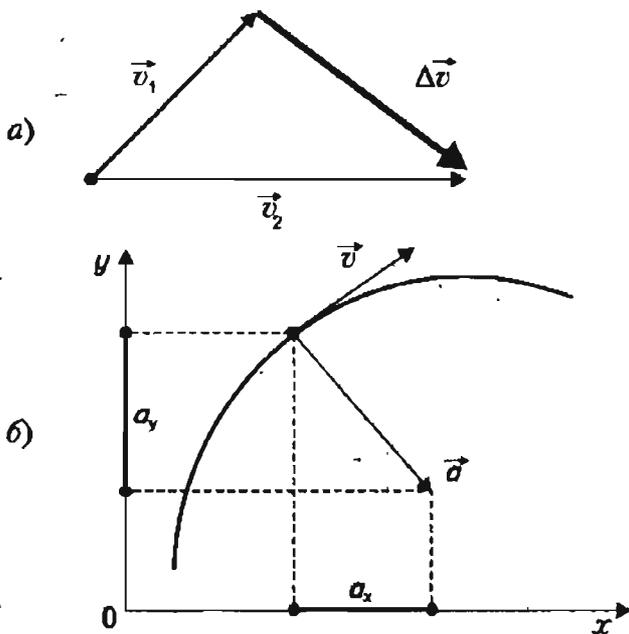


Рис. 56. Определение изменения скорости (а); проекции вектора ускорения (б):  $a_y = \frac{\Delta v_y}{\Delta t}; a_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t}$ .

$$a_y = \frac{\Delta v_y}{\Delta t}; a_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t}$$

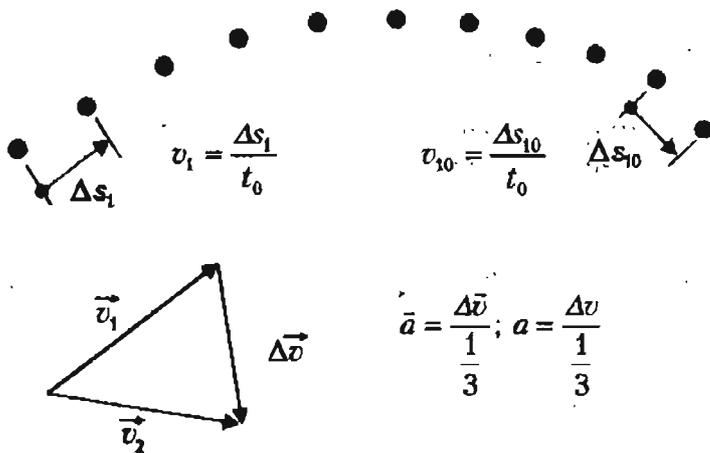


Рис. 58

- 4) **Уровень В.** Измерьте модуль вектора перемещения за все время движения; определите угол, который образует вектор перемещения с горизонтом.
- 5) Определите начальную скорость шарика, его скорость через  $\frac{1}{3}$  с после начала движения и его конечную скорость.
- 6) Пользуясь рис. 58:
- определите приблизительно ускорение движения за первые  $\frac{1}{3}$  с;
  - определите мгновенные скорости  $v_1$  и  $v_{10}$ ;
  - изобразите векторы  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_{10}$  в любом масштабе, отложив их из одной точки;
  - определите графически  $\Delta\vec{v}$  и  $\Delta\vec{v}$ ;

д) оцените модуль ускорения  $a = \frac{\Delta v}{\frac{1}{3}}$  с.

*Практикум по  
решению задач*

### Примеры решения типовых задач

#### Пример 1

Велосипедист движется по окружности радиуса 30 м. Чему равны путь и перемещение велосипедиста за  $\frac{1}{2}$  оборота? За полный оборот?

Решение

За  $\frac{1}{2}$  оборота путь велосипедиста равен:

$$l_1 = \pi R = 94,2 \text{ м};$$

перемещение равно:  $S_1 = 2R = 60 \text{ м}$ .

За полный оборот путь велосипедиста равен:

$$l_2 = 2\pi R = 188,4 \text{ м};$$

перемещение равно:  $S_2 = 0 \text{ м}$ .

#### Пример 2

График зависимости координаты тела от времени имеет вид, представленный на рис. 59. Чему приблизительно равны координаты тела в моменты времени  $t_1 = 2 \text{ с}$ ,  $t_2 = 3 \text{ с}$ . Как изменилась скорость тела в этом интервале?

Решение

Из графика  $x(t)$  легко определяются координаты тела:

$$x_{t=1\text{с}} = 4 \text{ м}, x_{t=3\text{с}} = 9 \text{ м}.$$

Скоростью называется отношение  $\frac{\Delta s}{\Delta t}$  при  $\Delta t \rightarrow 0$ .

Выбрав небольшой отрезок графика вблизи точек  $t_1 = 1 \text{ с}$ ,  $t_2 = 3 \text{ с}$  таким образом, чтобы  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = 0,5 \text{ с}$ , можно определить скорости  $v_1$  и  $v_2$ :

$$v_1 = \frac{\Delta x_1}{\Delta t_1} = \frac{4}{1} = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$v_2 = \frac{\Delta x_2}{\Delta t_2} = \frac{6}{1} = 6 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

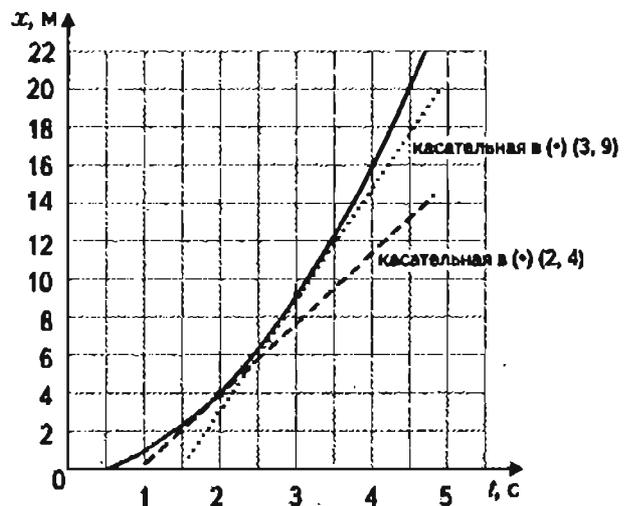


Рис. 59. Сравнение скоростей по графику зависимости координаты от времени

Видно, что скорость тела увеличилась. Впрочем, для такого вывода можно было не рассчитывать  $v_1$  и  $v_2$ , а сравнить крутизну графика в точках  $t_1 = 2$  с,  $t_2 = 3$  с, т. е. провести касательные и рассчитать тангенсы углов их наклона к оси  $Ot$ .

**Пример 3**

На рис. 60 приведен график зависимости координаты поезда от времени, полученный на графопостроителе диспетчером вокзала. В некоторые моменты времени перо графопостроителя переставало писать.

Какой, вероятнее всего, была координата поезда в моменты времени  $t_1 = 0,8$  ч и  $t_2 = 1,5$  ч?

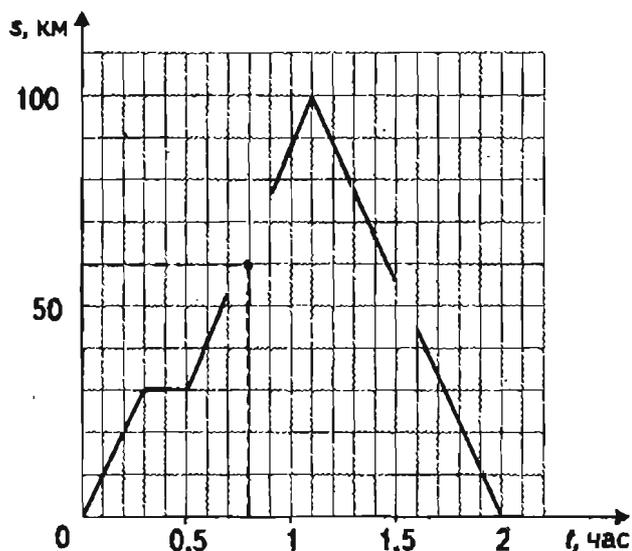


Рис. 60. Пользуясь графиком, можно с большой вероятностью предсказать положение тела даже если график «испорчен»

**Решение**

Интерполируя графики, считая, что закон движения в моменты плохой работы графопостроителя не изменялся, получим:  $s_1 = 60$  км,  $s_2 = 55$  км.

**Пример 4**

График зависимости проекции скорости  $v_x$  тела от времени приведен на рис. 61. Как изменялась проекция ускорения этого тела на ось  $Ox$ ? Оцените ускорение  $a_x$  тела в точках А, Б, В.

**Решение**

Проекцией ускорения  $a_x$  называют отношение  $\frac{\Delta v_x}{\Delta t}$  при  $\Delta t \rightarrow 0$ . Выбрав небольшие отрезки графика около точек А и Б так, чтобы  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = 1$  с, полу-

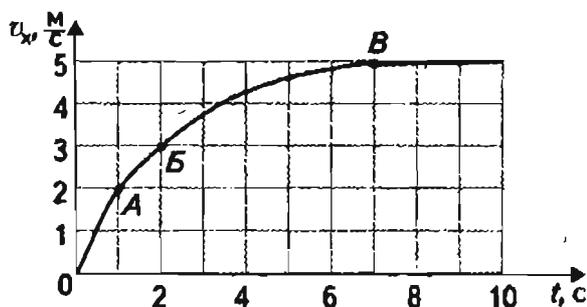


Рис. 61. Сравнение ускорений по графику скорости

чим, что  $a_{xA} \approx 2 \frac{м}{с^2}$ ,  $a_{xB} \approx 1 \frac{м}{с^2}$ , т. е. проекция ускорения тела уменьшалась. Этот же вывод следует из сравнения крутизны графика  $v_x(t)$  около точек А и Б. В точке В скорость  $v_x$  не изменяется, следовательно  $a_{xB} = 0$ .

**Решить самостоятельно**

1. Мяч отпустили с высоты 2 м, а после отскока он поднялся на высоту 1,5 м. Чему равны путь  $l$  и модуль перемещения  $s$  мяча?
2. Материальная точка движется по окружности радиуса  $R$ . Чему равны путь и модуль перемещения через  $\frac{1}{6}$  часть оборота?
3. При исследовании движения тела из состояния покоя была составлена следующая таблица зависимости координаты от времени.

$t, с$	0	0,5	1	1,5	2	3
$x, м$	0	0,25	1	2,25	4	9

Чему была равна координата тела в моменты времени  $t_1 = 2,5$  с,  $t_2 = 4$  с, если условия опыта не изменялись?

4. График зависимости модуля скорости тела от времени представлен на рис. 62. На каких участках пути модуль ускорения был минимален? Максимален?
5. На рисунке 63 на графике  $x(t)$  укажите моменты времени, в которые проекция скорости  $v_x$  принимает максимальные и минимальные значения.

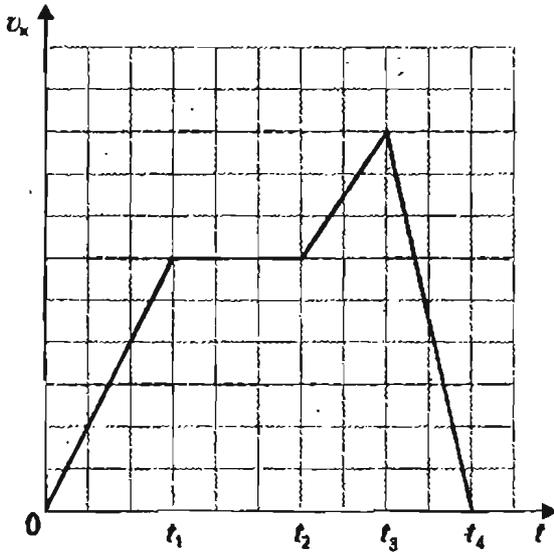


Рис. 62. Поиск наибольшего и наименьшего ускорений

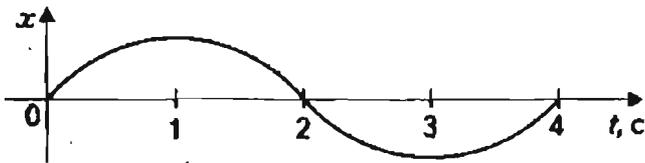


Рис. 63. Поиск наибольшей и наименьшей скорости

6. Наблюдая за движением тела (рис. 64), ученик построил график зависимости пути, пройденного телом, от времени. Какой, приблизительно, путь прошло тело за 4 с, если условия движения не изменились?

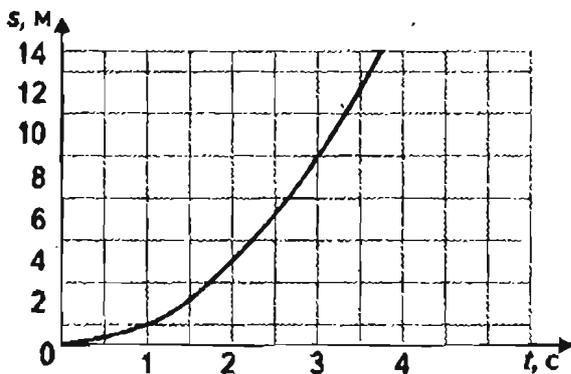


Рис. 64. График дает возможность предсказывать положение тела

Контрольные  
работы

### Основные понятия кинематики (уровень А)

#### Вариант 1

Т

1. Автомобиль дважды проехал вокруг Москвы по кольцевой дороге, длина которой 109 км. Чему равны пройденный автомобилем путь  $l$  и модуль его перемещения  $s$ ?

- А)  $l = 109$  км;  $s = 0$  км.  
 Б)  $l = 218$  км;  $s = 0$  км.  
 В)  $l = s = 218$  км.  
 Г)  $l = s = 0$  км.

2. По приведенной на рис. 65 стробоскопической фотографии определите время движения, измерьте пройденный путь и модуль перемещения; определите начальную скорость. Время между вспышками  $t_0 = 0,1$  с. Масштаб фотографии равен 1.

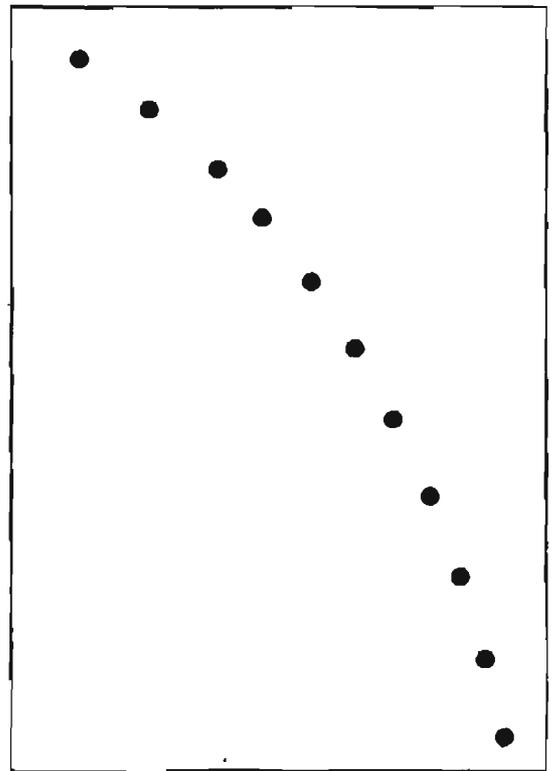


Рис. 65. Изображение стробоскопической фотографии

3. Пользуясь графиком зависимости  $x(t)$ , приведенным на рис. 66, определите координаты тела в моменты времени  $t_1 = 1$  с и  $t_2 = 4$  с. Определите изменение координат за вторую и пятую секунды. Сравните скорости тела в моменты времени  $t_1 = 1$  с и  $t_2 = 5$  с.

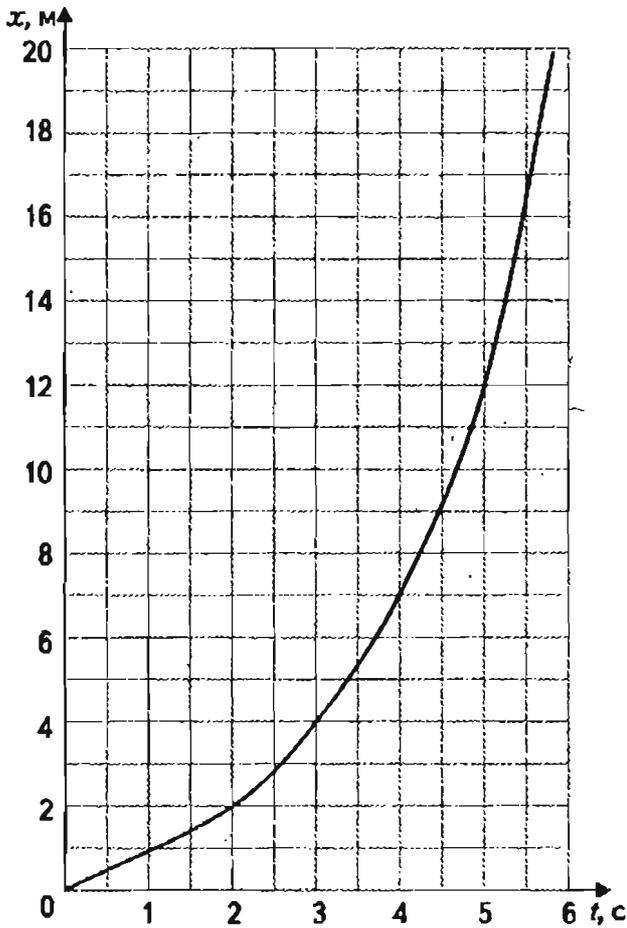


Рис. 66. Сравнение скоростей

**Вариант 2**

1. Спортсмен пробежал дистанцию 400 м по дорожке стадиона и возвратился к месту старта. Чему равен путь  $l$ , пройденный спортсменом, и модуль его перемещения  $s$ ?
- А)  $l = s = 0$  м.
- Б)  $l = s = 400$  м.
- В)  $l = 400$  м;  $s = 0$  км.
- Г)  $l = 0$  м;  $s = 400$  м.
2. По приведенной на рис. 65 стробоскопической фотографии определите время движения, измерьте пройденный путь и модуль перемеще-

ния; определите начальную скорость. Время между вспышками  $t_0 = 0,1$  с. Масштаб фотографии равен 1.

3. Пользуясь графиком зависимости  $x(t)$ , приведенным на рис. 67, определите координаты тела в моменты времени  $t_1 = 1$  с и  $t_2 = 5$  с. Определите изменение координат за вторую и шестую секунды. Сравните скорости тела в моменты времени  $t_1 = 1$  с и  $t_2 = 5$  с.

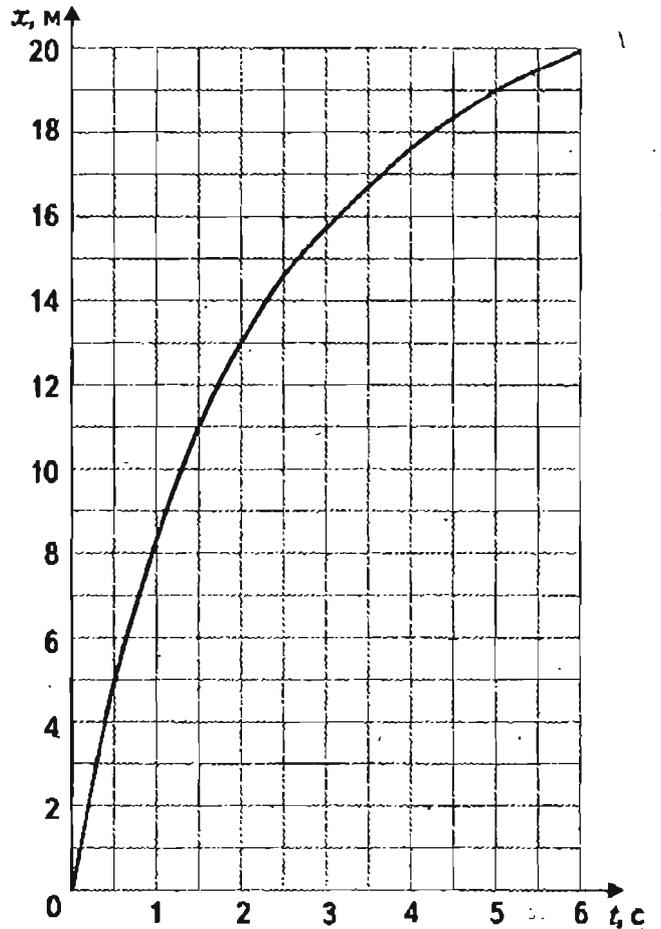


Рис. 67. Сравнение изменения координат и скоростей

**Контрольная работа повышенного уровня сложности (уровень Б)**

**Вариант 1**

1. На рис. 68 показана траектория движения материальной точки. Начальное положение  $A$ , конечное —  $B$ . Найдите координаты точек  $A$  и  $B$ , перемещение и путь, пройденный точкой.

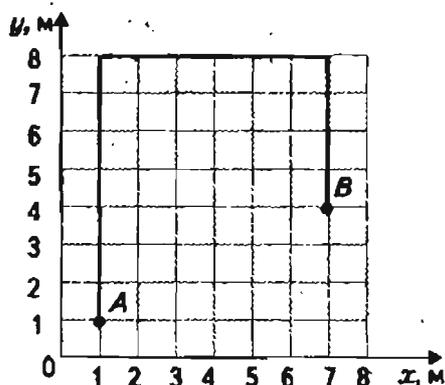


Рис. 68

2. Пользуясь стробоскопическим изображением движения шарика (рис. 65), оцените примерно ускорение шарика за первые 0,5 с.
3. График зависимости проекции скорости  $v_x$  от времени представлен на рис. 69. Как изменялась проекция ускорения движения этого тела на ось  $Ox$ ?

### Вариант 2

1. На рис. 70 показана траектория движения материальной точки. Начальное положение  $A$ , ко-

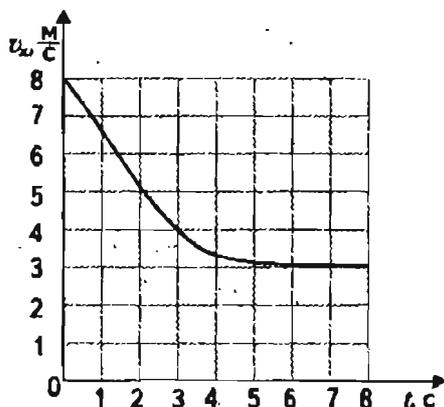


Рис. 69

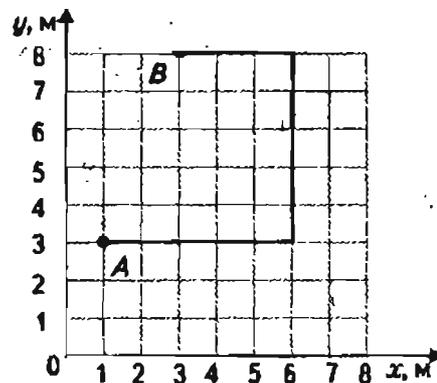


Рис. 70

нечное —  $B$ . Найдите координаты точек  $A$  и  $B$ , перемещение и путь, пройденный точкой.

2. Пользуясь стробоскопическим изображением движения шарика (рис. 65), оцените примерно ускорение шарика за первые 0,5 с.
3. График зависимости проекции скорости  $v_x$  от времени представлен на рис. 71. Как изменялась проекция ускорения движения этого тела на ось  $Ox$ ?

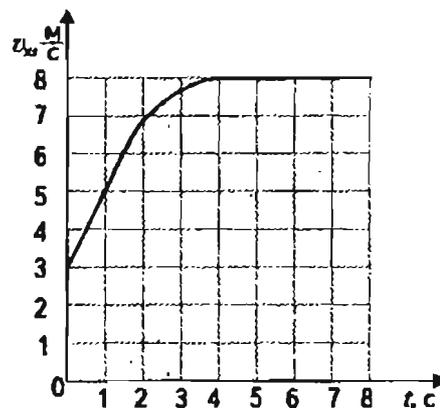


Рис. 71

## 2. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

Любые механические явления рассматриваются в какой-либо системе отсчета: движение имеет смысл только относительно других тел (схема 5).

При анализе движения одного и того же тела в разных системах отсчета все кинематические характеристики движения (траектория, путь, перемещение, скорость, ускорение) оказываются различными.

В качестве примера рассмотрим какую-либо точку обода колеса велосипеда, движущегося равно-

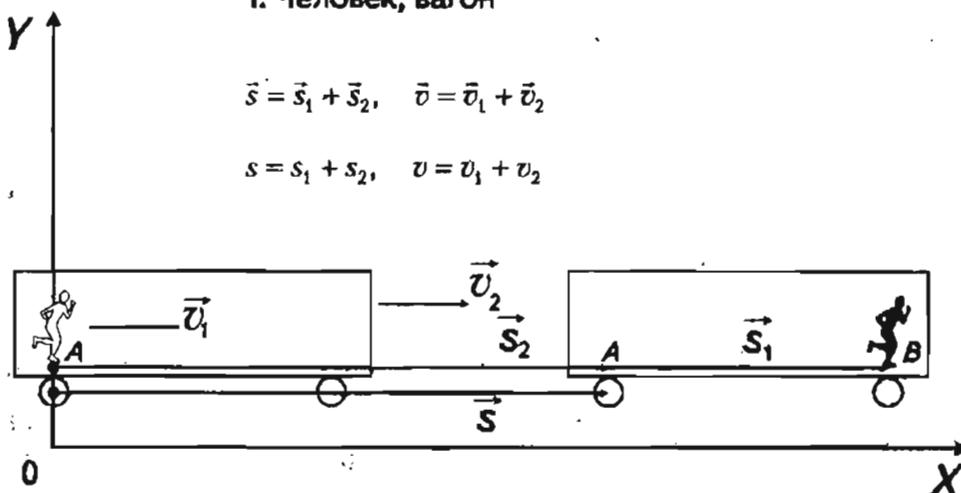
СХЕМА 5

**ПОЛОЖЕНИЕ ТЕЛА, ЕГО ДВИЖЕНИЕ – ОТНОСИТЕЛЬНЫ**

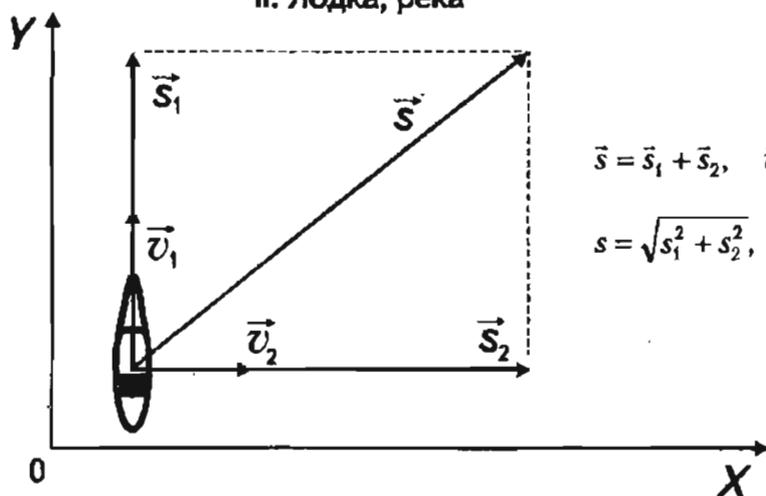
I. Человек, вагон

$$\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2, \quad \vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$$

$$s = s_1 + s_2, \quad v = v_1 + v_2$$

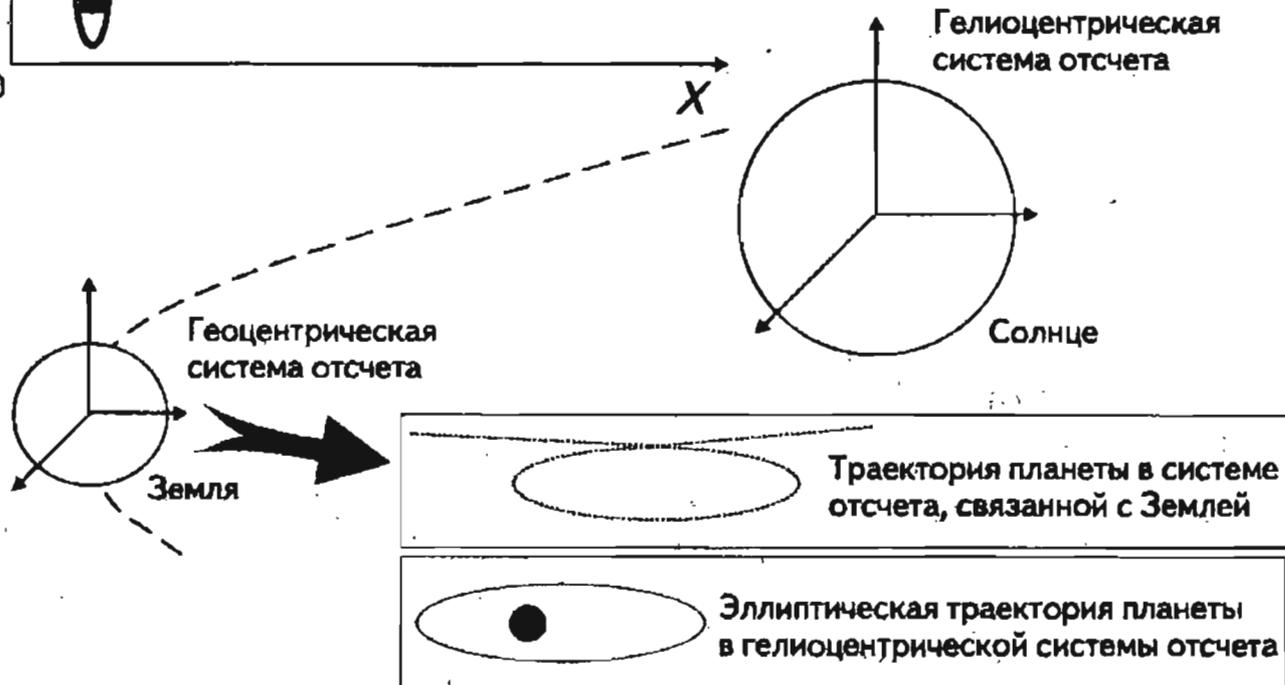


II. Лодка, река



$$\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2, \quad \vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$$

$$s = \sqrt{s_1^2 + s_2^2}, \quad v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$$



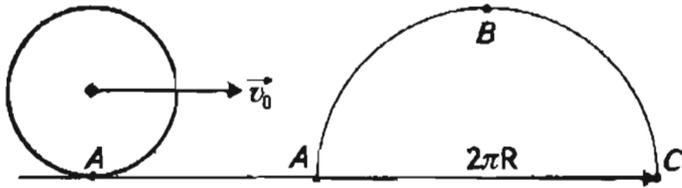


Рис. 72

мерно со скоростью  $v_0$  (рис. 72). В системе отсчета, связанной с колесом, точка  $A$  неподвижна. В системе отсчета, связанной с велосипедом, траектория точки — окружность. За время одного оборота точка проходит путь  $s = 2\pi R$ , модуль перемещения равен нулю.

В неподвижной системе отсчета точка  $A$  движется по линии  $ABC$  (называемой циклоидой), путь, пройденный ею за период, равен длине дуги циклоиды между точками  $A$  и  $C$ , модуль перемещения равен  $2\pi R$ .

Возникает вопрос о связи между различными кинематическими характеристиками одного и того же движения в разных системах отсчета.

### Связь перемещения одной и той же материальной точки в разных системах отсчета

Связь перемещения одной и той же материальной точки в разных системах отсчета — фундаментальный факт природы, отражающий геометрические свойства пространства.

Действительно, пусть система отсчета  $x'O'y'$  переместилась на  $\vec{s}_0$ , а точка  $A$  относительно нее переместилась на  $\vec{s}'$  (рис. 73).

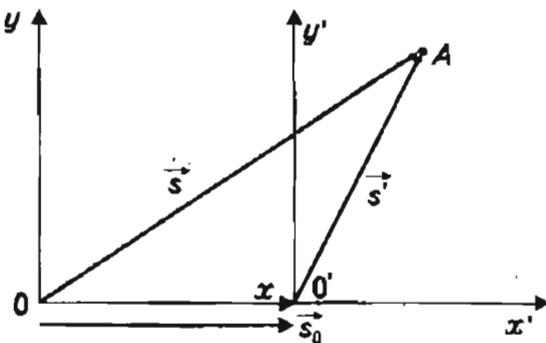


Рис. 73

Тогда ясно, что:  $\vec{s} = \vec{s}_0 + \vec{s}'$ , т. е. — перемещение точки  $\vec{s}$  относительно неподвижной системы отсчета равно геометрической сумме перемещения  $\vec{s}_0$  подвижной системы отсчета относительно неподвижной и перемещения  $\vec{s}'$  точки относительно подвижной системы отсчета.

### Теорема сложения скоростей

Вспользуемся теоремой сложения перемещений:  $\vec{s} = \vec{s}_0 + \vec{s}'$ . Разделим обе части равенства на малый промежуток времени  $\Delta t$ , за которое произошло перемещение:

$$\frac{\vec{s}}{\Delta t} = \frac{\vec{s}_0}{\Delta t} + \frac{\vec{s}'}{\Delta t}.$$

Тогда, учитывая, что отношение перемещения ко времени — скорость, мы получим теорему сложения скоростей:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{v}'.$$

Скорость  $\vec{v}$  точки относительно неподвижной системы отсчета равна геометрической сумме скорости  $\vec{v}_0$  подвижной системы отсчета относительно неподвижной и скорости  $\vec{v}'$  точки относительно подвижной системы отсчета (рис. 74).

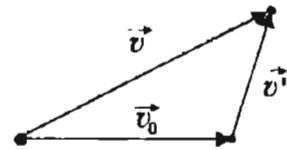


Рис. 74

До сих пор мы считали, что промежутки времени  $\Delta t$  во всех системах отсчета одинаковы. Это справедливо в рамках классической механики. При скоростях, близких к скорости света  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  это, оказывается, не выполняется, теорема сложения записывается так:

$$v = \frac{v_0 + v'}{1 + \frac{v_0 v'}{c^2}}.$$

При  $v_0$  и  $v$  значительно меньших  $c$ , получим  $v = v_0 + v'$ .

*Практикум по  
решению задач*

### Примеры решения задач

#### Пример 1

Две моторные лодки движутся вдоль направления течения реки навстречу друг другу. Скорость течения реки  $v_T = 2 \frac{м}{с}$ , скорость каждой лодки относительно воды  $v_n = 3 \frac{м}{с}$ . Через сколько времени после встречи расстояние между лодками станет равным  $s = 120 м$ ?

Решите задачу в системах отсчета, связанных с Землей и одной из лодок. Надо ли для решения задачи знать модуль скорости течения реки?

**Решение**

В системе отсчета, связанной с берегом реки, уравнение движения будет иметь вид:

$$s = (v_n + v_T) \cdot t + (v_n - v_T) \cdot t,$$

откуда  $t = \frac{s}{2v_n}$ ;  $t = 20 с$ .

В системе отсчета, связанной с лодкой, уравнение движения упрощается:

$$s = (v_n + v_T) \cdot t,$$

$$t = \frac{s}{2v_n}; t = 20 с.$$

#### Пример 2

Два автомобиля приближаются к перекрестку по взаимно перпендикулярным дорогам с постоянными скоростями  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$ . В момент времени, когда первый автомобиль достиг перекрестка, второй находился от него на расстоянии  $l_0$ .

Определите минимальное расстояние между автомобилями в процессе их движения. Проведите расчет при  $v_1 = 6 \frac{м}{с}$ ,  $v_2 = 8 \frac{м}{с}$ .

**Решение**

**1-й способ.** В качестве тела отсчета выберем Землю. Движение автомобилей по поверхности Земли на малых по сравнению с радиусом Земли расстояниях можно считать происходящим на плоскости. В этом случае положение каждого из них можно

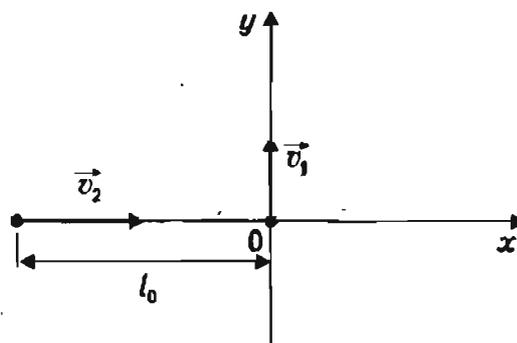


Рис. 75

задать двумя координатами. Оси координат  $Ox$  и  $Oy$  направим вдоль дорог в направлении движения автомобилей (рис. 75). За начало отсчета расстояний выберем перекресток, за начало отсчета времени — момент времени пересечения перекрестка первой машиной.

Начальные условия движения автомобилей запишем в виде:

$$v_{1x} = 0; v_{1y} = v_1; x_{01} = 0; y_{01} = 0;$$

$$v_{2x} = 2; v_{2y} = v_2; x_{02} = -l_0; y_{02} = 0.$$

Координаты машин в любой произвольный момент времени определяются уравнениями:

$$x_1 = x_{01} + v_{1x}t; x_2 = x_{02} + v_{2x}t,$$

$$y_1 = y_{01} + v_{1y}t; y_2 = y_{02} + v_{2y}t.$$

С учетом начальных условий получим:

$$x_1 = 0; x_2 = -l_0 + v_2t; y_1 = v_1t; y_2 = 0.$$

Как видно из рис. 76, расстояние между точками на плоскости можно выразить через их координаты следующим способом:

$$l = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}.$$

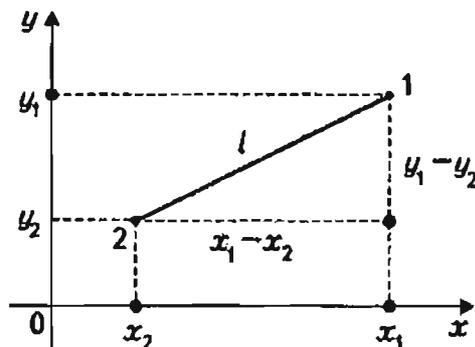


Рис. 76

Отсюда расстояние  $l$  между автомобилями в любой момент времени равно:

$$l = \sqrt{(l_0 - v_2 t)^2 + v_1^2 t^2}.$$

Итак, мы получили одно уравнение с двумя переменными  $l$  и  $t$ . Для нахождения искомой величины  $l$  необходимо составить второе уравнение. Для этого можно использовать тот факт, что расстояние  $l$  между автомобилями принимает минимальное из возможных значений, определяемых первым уравнением. Минимальное значение переменной величины  $l$ , связанной функциональной зависимостью с другой величиной  $t$ , легко находится методами дифференциального исчисления. Можно решить эту задачу и без привлечения методов высшей математики, однако решение получается довольно сложным. Можете попробовать его найти.

Решение задачи оказывается значительно более простым, если выбрать другую систему отсчета.

**2-й способ.** В качестве тела отсчета выберем второй автомобиль, направление координатных осей и начальный момент отсчета времени примем такими же, как и в первом способе решения задачи. В системе отсчета, связанной со вторым автомобилем, первый автомобиль движется со скоростью  $\vec{v}_{12}$ , равной:

$$\vec{v}_{12} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2; v_{12} = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}.$$

Эта скорость направлена под углом  $\alpha$  к прямой, соединяющей автомобили в начальный момент времени  $t = 0$  (рис. 77).

Кратчайшее расстояние между автомобилями равно длине отрезка перпендикуляра, опущенного из начала координат, в котором находится второй ав-

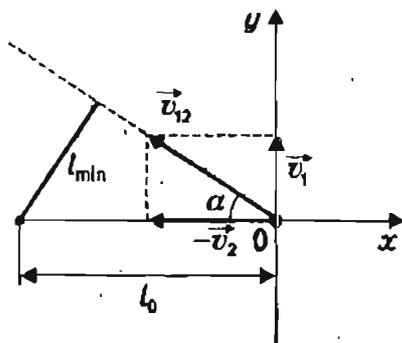


Рис. 77

томобиль, на прямую, по которой движется первый автомобиль.

Из рис. 77 видно, что

$$l_{\min} = l_0 \cdot \sin \alpha, \text{ где } \sin \alpha = \frac{v_1}{v_{12}},$$

$$l_{\min} = \frac{l_0 v_1}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}}.$$

Подставляя численные данные, получим:

$$l_{\min} = \frac{30 \cdot 6}{\sqrt{6^2 + 8^2}} = 18 \text{ м.}$$

### Решить самостоятельно

1. Ракета для фейерверка на высоте  $h = 100$  м разрывается в воздухе на два осколка. Скорость первого осколка  $v_1 = 60 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  и направлена вертикально вверх, скорость второго осколка  $v_2 = 40 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  и направлена вертикально вниз. На каком расстоянии друг от друга окажутся осколки через  $t = 0,5$  с? Решите задачу в системах отсчета, связанных с Землей и с одним из осколков.
2. С вершины наклонной плоскости длиной  $l = 2$  м начал скатываться шар. В этот же момент времени навстречу ему начал двигаться другой шар, находившийся у основания плоскости. Начальная скорость второго шара  $v_0 = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Через сколько времени произойдет столкновение шаров? Решите задачу в системах отсчета, связанных с Землей и одним из шаров; полученные решения сравните по степени их рациональности.
3. Пловец переплывает реку шириной  $h$ . Под каким углом к направлению вектора скорости течения воды он должен плыть, чтобы переправиться на противоположный берег за самое короткое время? Чему равно это минимальное время? Какой путь  $l$  он проплывет при этом, если скорость течения реки  $v_1 = 3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , а скорость пловца относительно воды  $v_2 = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ?
4. Под двумя пересекающимися под углом  $\alpha = 60^\circ$  дорогам движутся две автомашины с одинаковы-

ми скоростями, равными  $v_1 = v_2 = 72 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ . Че-

рез какое время после встречи у перекрестка расстояние между ними станет равным  $l = 12 \text{ км}$ ?

5. Из аэростата, поднимающегося вертикально вверх с постоянной скоростью  $v_0 = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , сброшен балласт. Определите путь  $l$  и перемещение  $s$  балласта относительно Земли и относительно аэростата за  $t = 2 \text{ с}$ .

6. Поезд длиной  $l_1 = 225 \text{ м}$ , движущийся с постоянной скоростью, проходит мимо телеграфного столба за  $t_1 = 15 \text{ с}$ . Сколько времени пройдет от момента входа тепловоза в туннель длиной  $L = 450 \text{ м}$  до выхода из туннеля последнего вагона? За какое время пройдет мимо машиниста первого поезда весь состав встречного поезда длиной  $l_2 = 300 \text{ м}$ , движущегося со скоростью  $v_2 = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ?

7. Определите минимальную скорость, с которой пловец может переплыть реку шириной  $h = 40 \text{ м}$  при условии, чтобы течение реки снесло его на расстояние не больше  $s = 30 \text{ м}$ . Каково направление этой скорости? Скорость течения реки  $v_r = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  (рис. 78).

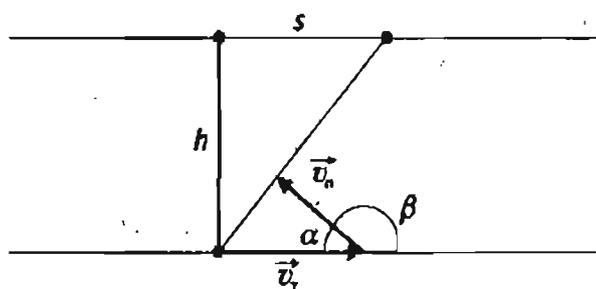


Рис. 78

*Контрольные  
работы*

### Вариант 1

1. Вертолет равномерно поднимается вертикально вверх. Какова траектория движения точки на конце лопасти винта вертолета в системе отсчета, связанной с корпусом вертолета?

- А) Точка.  Б) Прямая.  
 В) Окружность.  Г) Винтовая линия.

2. Пловец плавает по течению реки. Чему равна скорость пловца относительно берега реки, если скорость пловца относительно воды  $1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , а скорость течения реки  $0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ?

- А)  $0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .  Б)  $1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

- В)  $1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .  Г)  $2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

3. Плот равномерно плавает по реке со скоростью  $6 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ . Человек движется поперек плота со скоростью  $8 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ . Чему равна скорость человека в системе отсчета, связанной с берегом?

- А)  $2 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ .  Б)  $7 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ .

- В)  $10 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ .  Г)  $14 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ .

4. К перекрестку приближаются грузовая машина со скоростью  $v_1 = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  и легковая машина со скоростью  $v_2 = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  (рис. 79). Какое направление имеет вектор  $\vec{v}_{21}$  скорости легкой машины в системе отсчета грузовика?

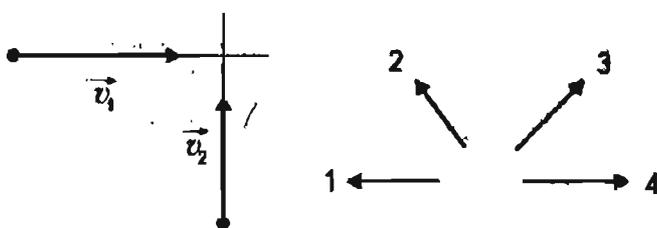


Рис. 79. Два автомобиля приближаются к перекрестку

- А) 1.  Б) 2.

- В) 3.  Г) 4.

5. На графике изображена зависимость проекции скорости тела, движущегося вдоль оси  $Ox$ , от времени (рис. 80). Чему равен модуль перемещение тела к моменту времени  $t = 10 \text{ с}$ ?

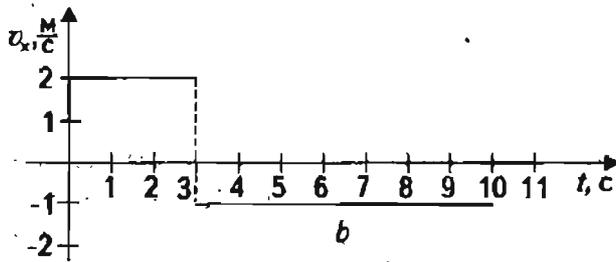


Рис. 80

- А) 1 м.                       Б) 6 м.  
 В) 7 м.                       Г) 13 м.

6. Лодка переплывает реку шириной 600 м, причем рулевой все время держит курс перпендикулярно берегам. Скорость лодки относительно воды  $5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , скорость течения реки  $3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Через сколько времени лодка достигнет противоположного берега?

- А) 120 с.                       Б) 150 с.  
 В) 200 с.                       Г) 90 с.

## Вариант 2

1. Вертолет равномерно поднимается вертикально вверх. Какова траектория движения точки на конце лопасти винта вертолета в системе отсчета, связанной с землей?

- А) Точка.                       Б) Прямая.  
 В) Окружность.               Г) Винтовая линия.

1/2. Пловец плывет против течения реки. Чему равна его скорость относительно берега реки, если скорость пловца относительно воды  $1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , а скорость течения реки  $0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ?

- А)  $0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .                       Б)  $1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .  
 В)  $1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .                       Г)  $2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

3. Кран равномерно поднимает груз вертикально вверх со скоростью  $0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  и одновременно равномерно и прямолинейно движется по горизонтальным рельсам со скоростью  $0,4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Чему равна скорость груза в системе отсчета, связанной с Землей?

- А)  $0,1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .                       Б)  $0,35 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .  
 В)  $0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .                       Г)  $0,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

4. Капля дождя, летящая с постоянной скоростью  $\vec{v}$  вертикально вниз, попадает на вертикальную поверхность стекла вагона, движущегося с постоянной скоростью  $\vec{u}$  (рис. 81). Какая из траекторий на рисунке соответствует следу капли на стекле?

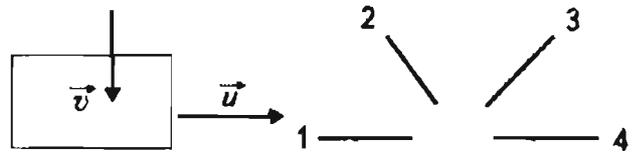


Рис. 81

- А) 1.                               Б) 2.  
 В) 3.                               Г) 4.

5. На графике (рис. 82) изображена зависимость проекции скорости тела, движущегося вдоль оси  $Ox$ , от времени. Какой путь прошло тело к моменту времени  $t = 10$  с?

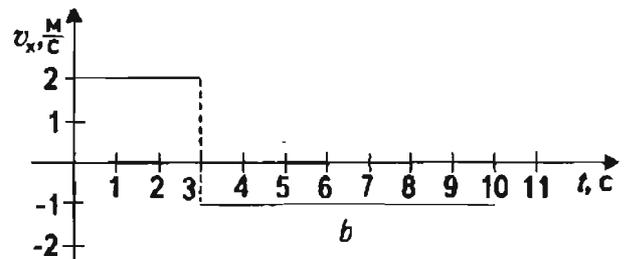


Рис. 82

- А) 1 м.                               Б) 6 м.  
 В) 7 м.                               Г) 13 м.

6. Скорость движения моторной лодки, плывущей относительно берега по течению, равна  $3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , а скорость этой же лодки, плывущей против течения, равна  $2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Чему равна скорость течения?

- А)  $0,5 \frac{м}{с}$        Б)  $1 \frac{м}{с}$   
 В)  $1,5 \frac{м}{с}$        Г)  $2,5 \frac{м}{с}$

**Контрольная работа повышенного уровня сложности**

**Вариант 1**

1. Лодка подтягивается лебедкой к берегу (рис. 83). Скорость  $v$  наматывания каната на лебедку равна  $1 \frac{м}{с}$ . С какой скоростью движется лодка в момент времени, когда канат составляет угол  $30^\circ$  с горизонтальной плоскостью?

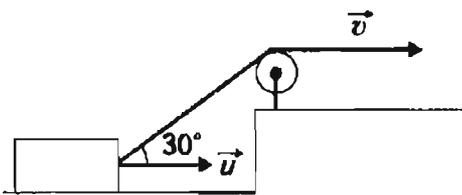


Рис. 83

- А)  $0,87 \frac{м}{с}$        Б)  $1 \frac{м}{с}$   
 В)  $1,15 \frac{м}{с}$        Г)  $0,58 \frac{м}{с}$   
 Д)  $1,73 \frac{м}{с}$

2. Кусок мела, летящий со скоростью  $\vec{v}$  в горизонтальной плоскости, попадает на горизонтальную поверхность доски, которая движется с постоянной скоростью  $\vec{u}$  (рис. 84). Какая из траекторий на рисунке соответствует следу мела на доске?

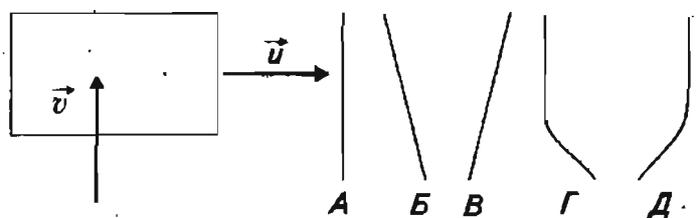


Рис. 84

- А) А.       Б) Б.  
 В) В.       Г) Г.  
 Д) Д.

3. Мимо пристани проплывает плот. В этот момент в поселок, находящийся на расстоянии  $l = 15$  км от пристани, вниз по реке отправляется моторная лодка. Она доплыла до поселка за время  $t = \frac{3}{4}$  ч и, повернув обратно, встретила плот на расстоянии  $s = 9,0$  км от поселка. Каковы скорость течения реки и скорость лодки относительно воды?
4. Из пункта А по взаимно перпендикулярным дорогам выехали два автомобиля: один — со скоростью  $30 \frac{км}{ч}$ , другой — со скоростью  $40 \frac{км}{ч}$ . С какой относительной скоростью они удаляются друг от друга?

**Вариант 2**

1. Акробат идет по верхней части шара так, что центр шара движется с постоянной скоростью  $\vec{v}$  (рис. 85). В какую сторону движется акробат относительно верхней части поверхности шара?

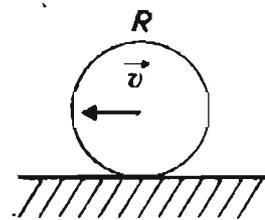
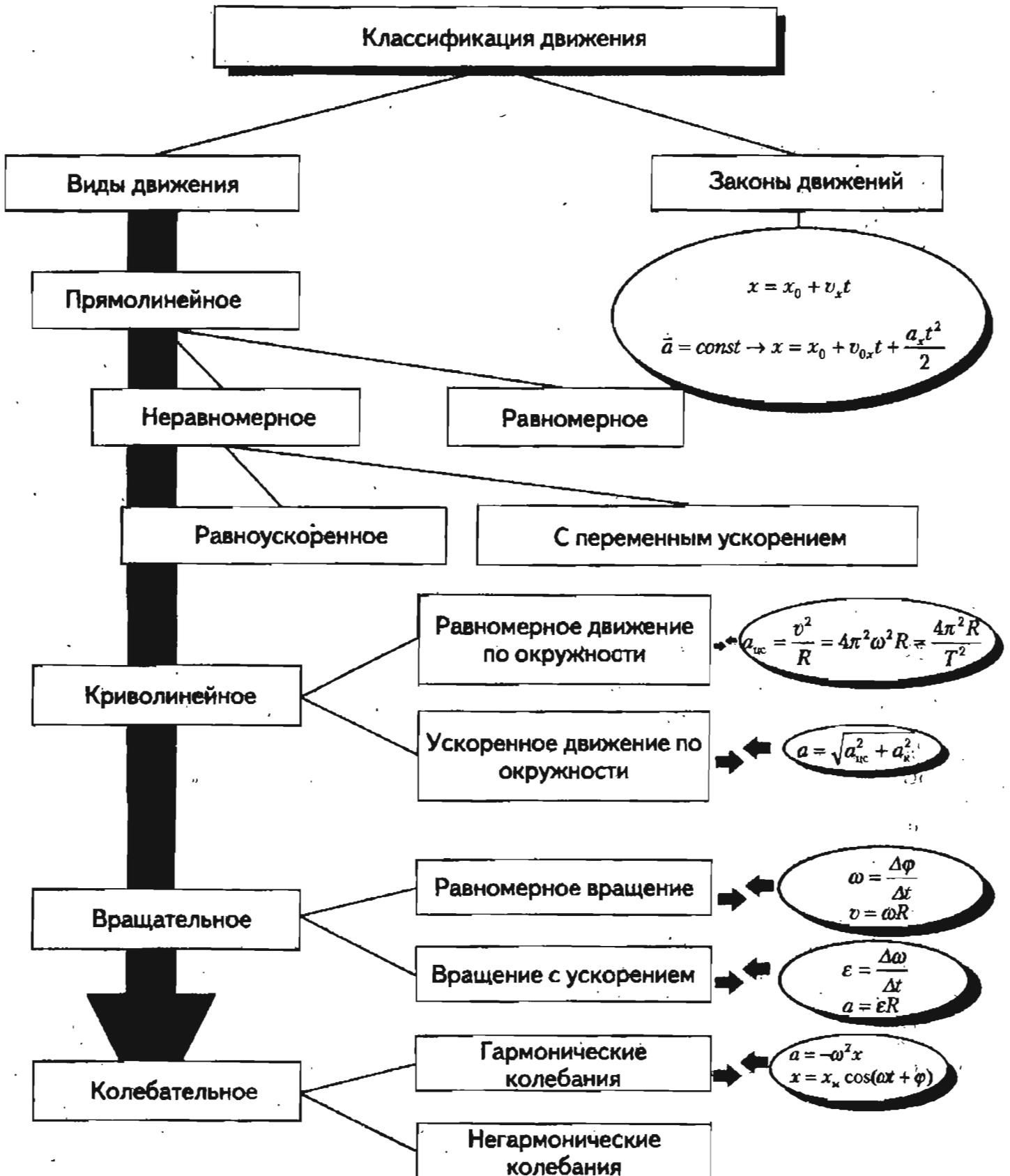


Рис. 85

- А) По направлению вектора  $\vec{v}$ .  
 Б) Противоположно вектору  $\vec{v}$ .  
 В) Относительно поверхности шара акробат неподвижен.
2. Диск радиуса  $R$  катится по горизонтальной поверхности без проскальзывания (рис. 86). В момент времени  $t$  скорость точки  $O$  равна  $\vec{v}_0$ , ускорение равно нулю. Чему равны скорость и ускорение точки А в системе отсчета, связанной с Землей?

## СХЕМА 6



- А)  $v_0; \frac{v_0^2}{R}$        Б)  $2v_0; \frac{v_0^2}{R}$   
 В)  $2v_0; \frac{4v_0^2}{R}$        Г)  $2v_0; \frac{v_0^2}{2R}$   
 Д)  $v_0; \frac{v_0^2}{2R}$        Е)  $2v_0; \frac{2v_0^2}{R}$

3. Корабль плывет на юг со скоростью  $42,3 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ . Заметив в море катер, наблюдатель, находящийся на палубе корабля, определил, что катер движется на северо-восток со скоростью  $30 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ . Какова скорость катера и в каком направлении он идет?

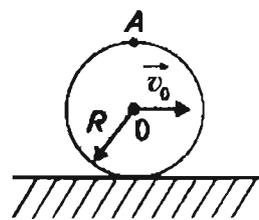


Рис. 86

4. Локомотив движется на восток со скоростью  $18 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ . Дым из трубы поднимается вертикально. Определить скорость и направление ветра.

### 3. РАВНОМЕРНОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

Из классификации движений (схема 6) видно, что **равномерным** может быть и движение по прямой линии, и движение криволинейное (траектория — кривая линия).

*Равномерным называется движение, при котором точка за любые равные промежутки времени проходит одинаковые пути.*

Равномерное движение (прямолинейное или криволинейное) — это движение с постоянной по модулю скоростью. Однако эти движения отличаются друг от друга. При прямолинейном равномерном движении вектор скорости не только постоянен по модулю — его направление неизменно.

При криволинейном равномерном движении вектор скорости изменяется по направлению. Следо-

вательно, равномерное криволинейное движение является ускоренным (рис. 87).

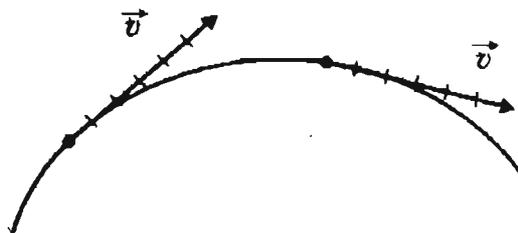


Рис. 87. Равномерное движение по криволинейной траектории оказывается ускоренным

Итак, при равномерном прямолинейном движении:  $\vec{v} = \text{const}$ ,  $v = \text{const}$ ; а при криволинейном равномерном движении:  $\vec{v} \neq \text{const}$ ,  $v = \text{const}$ .

При равномерном прямолинейном движении  $\vec{v} = \text{const}$ . Следовательно:

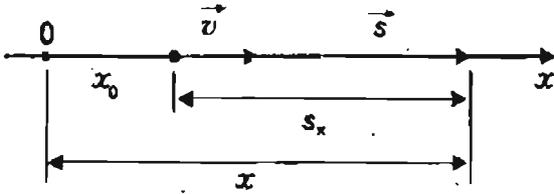


Рис. 88

$$\vec{s} = \vec{v} \cdot t \text{ или } s_x = v_x \cdot t.$$

Для получения уравнения равномерного прямолинейного движения рассмотрим рис. 88. Из него видно, что:

$$x = x_0 + v_x \cdot t.$$

В табл. 6 приведены примеры уравнений движения.

Таблица 6. Примеры уравнений движения

1		$x = 3 + 2t$
2		$x = -5 + 3t$
3		$x = 8 - 3t$
4		$x = -4 - 2t$
5		$x = 3t$
6		$x = -4t$

Графики зависимости проекции скорости и координаты от времени приведены на рис. 89.

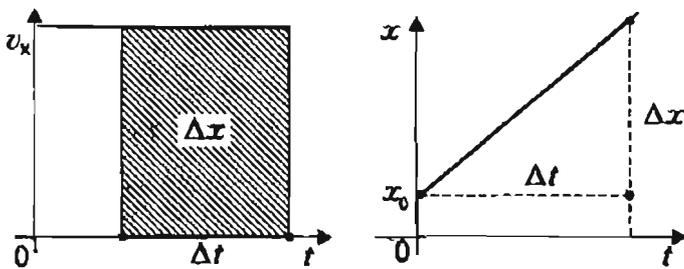


Рис. 89

Графики скорости и координаты взаимосвязаны. Действительно, для нахождения проекции скорости по графику уравнения движения достаточно

найти отношение  $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ . С другой стороны, изменение координаты  $\Delta x$  находится как площадь на графике зависимости  $v_x$  от  $t$ .

*Практикум по решению задач*

### Примеры решения задач

#### Пример 1

Из одного пункта  $A$  в одном направлении отправились два мотоциклиста, скорости которых  $v_1 = 45 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ ,  $v_2 = 60 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$  относительно Земли. Второй мотоциклист выехал на  $t_0 = 1$  ч позднее первого. Через сколько времени после своего отправления и на каком расстоянии от пункта  $A$  второй мотоциклист догонит первого?

Решите задачу аналитически и графически.

Аналитическое решение

- В качестве тела отсчета выберем «Землю». Поскольку движение происходит по одной прямой, выберем направление оси  $Ox$  системы координат, совпадающее с направлением движения мотоциклистов. Началом отсчета координат будет пункт « $A$ ».
- За начало отсчета времени выберем момент отправления второго мотоциклиста. Координаты обоих мотоциклистов в начальный момент времени равны:  $x_{01} = v_1 \cdot t_0$ ;  $x_{02} = 0$ ; начальные скорости  $v_1$  и  $v_2$  (рис. 90).

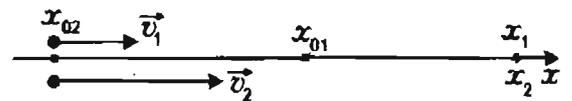


Рис. 90

3.

$$x_1 = x_{01} + v_1 \cdot t; \quad x_1 = v_1(t + t_0);$$

$$x_2 = x_{02} + v_2 \cdot t; \quad x_2 = v_2 \cdot t.$$

4. В момент, когда второй мотоциклист догонит первого:

$$x_1 = x_2,$$

$$v_1 \cdot (t + t_0) = v_2 \cdot t,$$

$$t = \frac{v_1 t_0}{v_2 - v_1}$$

Подставив численные значения, получим:

$$t = \frac{45 \frac{\text{км}}{\text{ч}} \cdot 1 \text{ ч}}{60 \frac{\text{км}}{\text{ч}} - 45 \frac{\text{км}}{\text{ч}}} = 3 \text{ ч.}$$

Расстояние места встречи мотоциклистов от пункта А ( $l$ ) равно разности координат:

$$l = x_2 - x_{02} = v_2 \cdot t; l = 60 \frac{\text{км}}{\text{ч}} \cdot 3 \text{ ч} = 180 \text{ км.}$$

**Графическое решение**

Первые три этапа остаются такими же, как и при аналитическом решении задачи.

4. Строим графики движений обоих мотоциклистов, используя полученные уравнения (рис. 91). Для построения графиков заполняем таблицу значений координат  $x_1$  и  $x_2$  в заданные моменты времени.

$t$	0 часов	1 час
$x_1$	45 км	90 км
$x_2$	0	60 км

Момент встречи определяется точкой пересечения графиков перемещения мотоциклистов, так как в точке пересечения они имеют одинаковую координату.

Из рис. 91 видно, что второй мотоциклист догонит первого через 3 часа после своего отправления на расстоянии 180 км от пункта А.

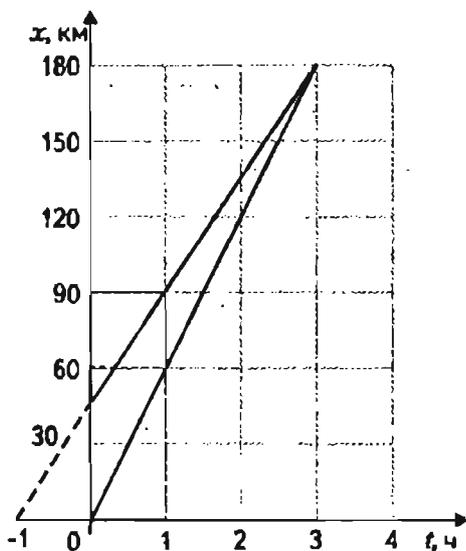


Рис. 91

**Пример 2**

Точка А совершает движение на плоскости  $xy$ . Координаты точки, в зависимости от времени, изменяются по закону:

$$x = -2t \text{ (м)}; y = 2 + 3t \text{ (м)}.$$

Запишите уравнение траектории  $y(x)$  точки А. Чему равны начальные координаты движущейся точки и координаты через 2 с после начала движения. Постройте график функции  $y(x)$ .

**Решение**

Выразив  $t$  из первого уравнения ( $t = -\frac{x}{2}$ ) и подставив его во второе уравнение, получим:

$$y = 2 - 1,5x.$$

В начальный момент времени:  $t = 0$ ;  $x = 0$  (м);  $y = 2$  (м).

Через  $t = 2$  с:  $x = -4$  (м);  $y = 8$  (м).

График функции  $y(x)$  показан на рис. 92.

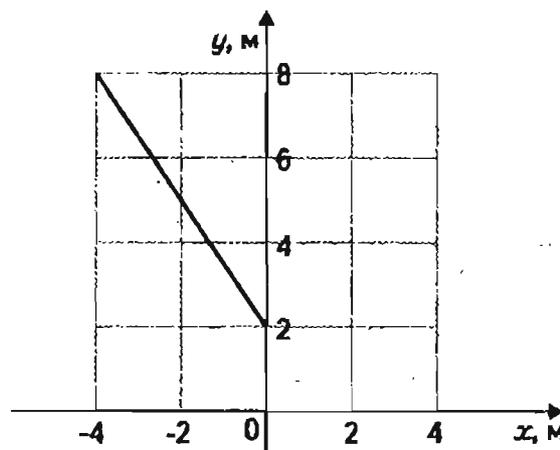


Рис. 92

**Пример 3**

Первую половину времени тело двигалось со скоростью  $v_1 = 40 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ , а вторую половину времени — со скоростью  $v_2 = 60 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ . Чему равна средняя скорость тела?

**Решение**

Средняя скорость равна:  $v_{\text{ср}} = \frac{s}{t}$ , где  $s$  — путь, пройденный телом:  $s = \frac{v_1 t}{2} + \frac{v_2 t}{2}$ .

$$\text{Отсюда } v_{\text{ср}} = \frac{\frac{v_1 t}{2} + \frac{v_2 t}{2}}{t} = \frac{v_1 + v_2}{2} = 50 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$$

### Решить самостоятельно

1. Поезд длиной  $l_1 = 150$  м движется равномерно по мосту со скоростью  $v = 18 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ . За какое время поезд пройдет мост длиной  $l = 650$  м?
2. На рис. 93 показаны графики движения двух тел, движущихся равномерно. Чему равны скорости тел? Запишите уравнения движения этих тел.

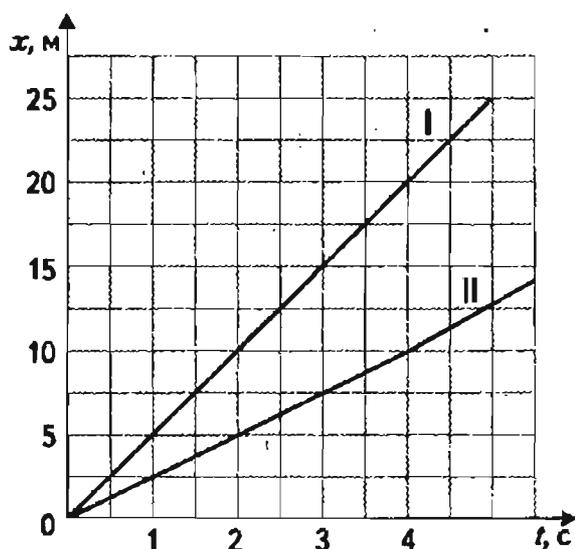


Рис. 93

3. Двигаясь из города равномерно со скоростью  $72 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$  по прямой дороге, автомобиль в 10 часов утра находится от него на расстоянии 25 км. На каком расстоянии от города будет автомобиль в 12 часов, если он продолжает двигаться в том же направлении и с той же скоростью?
4. Вдоль оси  $Ox$  движутся два тела, которые можно считать материальными точками. Первое тело движется по закону:  $x_1 = 20 + 4t$  (м), второе — по закону:  $x_2 = 8 + 10t$  (м). Чему равны проекции скорости тел на ось  $Ox$ ? В какой момент времени они встретятся? Чему равна координата тел в этот момент времени?

5. Движение тела на плоскости описывается уравнениями:  $x = 3t$  (м);  $y = 6t$  (м). Напишите уравнение траектории движения точки и постройте ее на плоскости  $xOy$ .

*Контрольные  
работы*

### Вариант 1

1. По графику зависимости пройденного пути от времени (рис. 94) определите скорость велосипедиста в момент времени  $t = 2$  с.

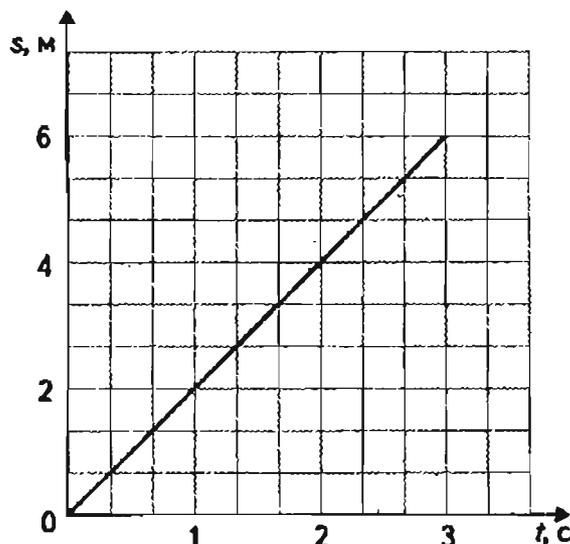


Рис. 94

- |   |  |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> А) $2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ | <input type="checkbox"/> Б) $3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  |
| <input type="checkbox"/> В) $6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ | <input type="checkbox"/> Г) $18 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ |

2. На рис. 95 представлены три графика зависимости пройденного пути от времени. Какое из тел двигалось с большей скоростью?

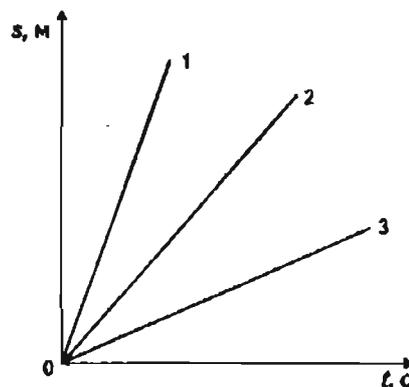


Рис. 95

- А) 1.                       Б) 2.  
 В) 3.                       Г) Скорости всех трех тел одинаковы.

3. Поезд длиной 200 м въезжает в тоннель длиной 300 м, двигаясь равномерно со скоростью  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Через какое время поезд выйдет полностью из тоннеля?

- А) 10 с.                       Б) 20 с.  
 В) 30 с.                       Г) 50 с.

4. Две моторные лодки движутся вдоль реки навстречу друг другу. Скорости лодок относительно воды равны  $3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  и  $4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  соответственно. Скорость течения реки равна  $2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Через какое время после их встречи расстояние между лодками станет равным 84 м?

Скорость течения реки равна  $2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Через какое время после их встречи расстояние между лодками станет равным 84 м?

- А) 12 с.                       Б) 21 с.  
 В) 28 с.                       Г) 42 с.

5. Лодка подтягивается лебедкой к берегу. Скорость наматывания каната на лебедку постоянна и равна  $\bar{v}$ . С какой скоростью движется лодка в момент, когда канат составляет угол  $\alpha$  с вертикалью? (рис. 96)

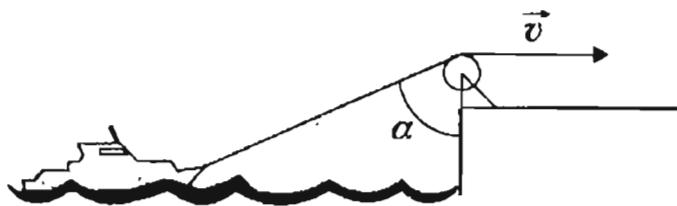


Рис. 96

- А)  $v \cdot \sin \alpha$ .                       Б)  $v \cdot \cos \alpha$ .  
 В)  $\frac{v}{\sin \alpha}$ .                       Г)  $\frac{v}{\cos \alpha}$ .

6. Половину пути автомобиль проходит с постоянной скоростью  $v_1$ , а вторую половину пути — со скоростью  $v_2$ , двигаясь в том же направлении. Чему равна средняя скорость автомобиля?

- А)  $\frac{v_1 + v_2}{2}$ .                       Б)  $\frac{v_1 v_2}{v_1 + v_2}$ .  
 В)  $\frac{2v_1 v_2}{v_1 + v_2}$ .                       Г)  $\frac{v_1 v_2}{2(v_1 + v_2)}$ .

Вариант 2

1. По графику зависимости пройденного пути от времени (рис. 97) определите скорость велосипедиста в момент времени  $t = 3$  с.

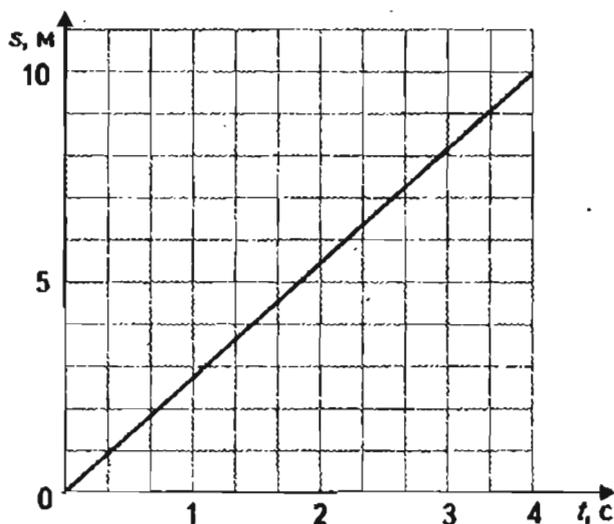


Рис. 97

- А)  $4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .                       Б)  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .  
 В)  $40 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .                       Г)  $2,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

2. На рис. 98 представлены три графика зависимости пройденного пути от времени. Какое из тел двигалось с меньшей скоростью?

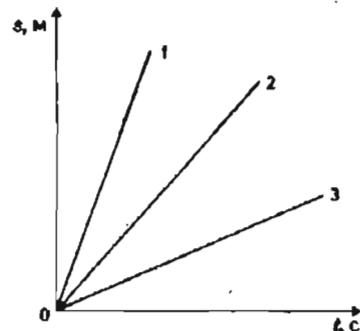


Рис. 98

- А) 1.                       Б) 2.  
 В) 3.                       Г) Скорости всех трех тел одинаковы.

3. Поезд длиной 200 м въезжает на мост со скоростью  $5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . За сколько времени поезд пройдет весь мост, если длина моста 300 м?
- А) 20 с.                       Б) 40 с.  
 В) 60 с.                       Г) 100 с.
4. По двум пересекающимся под углом  $60^\circ$  дорогам движутся два автомобиля с одинаковыми по модулю скоростями, равными  $20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Через какое время после встречи у перекрестка расстояние между ними станет равным 3 км?
- А) 75 с.                       Б) 88 с.  
 В) 150 с.                       Г) 300 с.
5. Лестница, приставленная к вертикальной стене, падает в результате скольжения ее основания по полу. Каково отношение модулей скоростей  $v_A$  и  $v_B$  в тот момент, когда угол между лестницей и стеной равен  $\alpha$ ? (рис. 99)

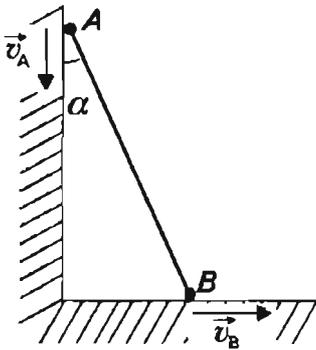


Рис. 99

- А)  $\sin \alpha$ .                       Б)  $\cos \alpha$ .  
 В)  $\operatorname{tg} \alpha$ .                       Г)  $\operatorname{ctg} \alpha$ .
6. Автомобиль затратил на прохождение пути время  $t$ . Первую половину времени автомобиль проходил с постоянной скоростью  $20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , а вторую половину времени — со скоростью  $30 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , двигаясь в том же направлении. Чему равна средняя скорость автомобиля?
- А)  $25 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .                       Б)  $24 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .  
 В)  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .                       Г)  $50 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

### Контрольная работа повышенного уровня сложности

#### Вариант 1

- Пассажир едет в поезде, скорость которого  $v_1 = 80 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ . Навстречу этому поезду движется товарный состав длиной  $l = 1,0$  км со скоростью  $v_2 = 40 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ . Сколько времени товарный состав будет двигаться мимо пассажира?
- Из пунктов  $A$  и  $B$ , расстояние между которыми  $l$ , движутся в одном направлении два тела со скоростями  $v_1$  и  $v_2$ , причем, из точки  $B$  тело начало двигаться спустя время  $t_0$  после начала движения тела из точки  $A$ . Через какое время встретятся тела?
- Из двух городов навстречу друг другу выехали два автобуса: один — в момент  $t_1 = 9$  ч 00 мин, а другой — в момент  $t_2 = 9$  ч 30 мин. Первый двигался со скоростью  $v_1 = 40 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ , а второй — со скоростью  $v_2 = 60 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ . Длина маршрута  $l = 120$  км. В котором часу и на каком расстоянии от городов встретились автобусы?

#### Вариант 2

- Из пунктов  $A$  и  $B$ , расположенных на расстоянии  $l = 120$  км друг от друга, одновременно навстречу друг другу начали двигаться два автомобиля. Скорость первого автомобиля  $v_1 = 70 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ , второго  $v_2 = 50 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ . Определить, через какое время и на каком расстоянии от пункта  $A$  они встретятся. Какое расстояние до встречи пройдет один автомобиль в системе координат, связанной с другим автомобилем?
- Из двух населенных пунктов  $A$  и  $B$ , расположенных вдоль шоссе на расстоянии  $l = 3,0$  км друг от друга, в одном направлении одновременно начали движение велосипедист и пешеход. Велосипедист, движущийся из пункта  $A$ , имел скорость  $v_1 = 15 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ , а пешеход, движущийся из пункта  $B$ , имел скорость  $v_2 = 5,0 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ . Через сколько вре-

мени велосипедист догонит пешехода? Какие пути они пройдут при этом?

3. Первую половину времени тело движется со скоростью  $v_1 = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  под углом  $\alpha_1 = 30^\circ$  к за-

данному направлению, а вторую — под углом  $\alpha_2 = 120^\circ$  к тому же направлению со скоростью  $v_2 = 40 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Найти среднюю скорость перемещения. Какой путь тело пройдет за время  $t = 4,0 \text{ с}$ ?

## 4. РАВНОУСКОРЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

Равноускоренным называется движение, при котором *вектор ускорения не изменяется*:  $\vec{a} = \text{const}$ . Из классификации движений, представленной на схеме 5, видно, что при  $\vec{a} = \text{const}$  может быть как прямолинейное, так и криволинейное движение. Это зависит от направления начальной скорости  $\vec{v}_0$  по отношению к ускорению.

Действительно, пусть векторы  $\vec{a}$  и  $\vec{v}_0$  совпадают или противоположны по направлению. Тогда:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a} \cdot \Delta t; \quad \vec{v} = \vec{v}_0 - \vec{a} \cdot \Delta t.$$

Траектория оказывается прямой линией (рис. 100, а, б).

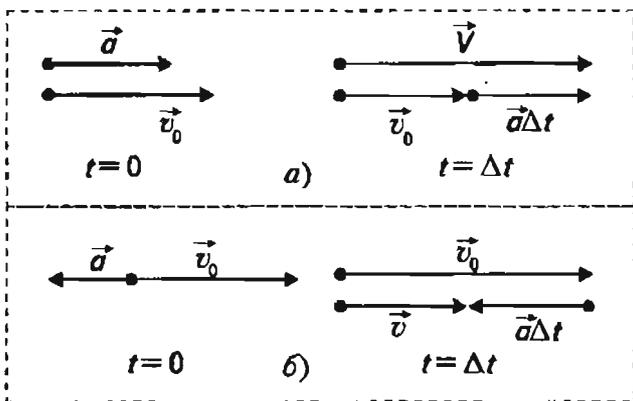


Рис. 100

Пусть между  $\vec{v}_0$  и  $\vec{a}$  есть некоторый угол. Тогда направление вектора  $\vec{v}$  через  $\Delta t$  с будет отличаться от направления  $\vec{v}_0$ . Движение оказывается криволинейным (рис. 101).

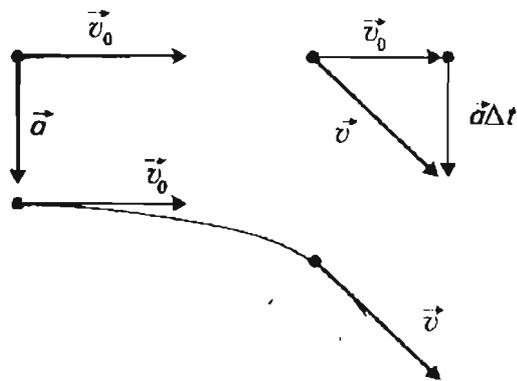


Рис. 101

При рассмотрении одного и того же движения в разных системах отсчета, движущихся относительно друг друга с постоянной скоростью  $\vec{v}$ , начальная скорость движения будет различна.

Это приведет к тому, что траектории движения тела в разных системах отсчета будут различны. Так, например, мяч, выпущенный из рук пассажира вагона, движущегося со скоростью  $\vec{v}$ , падает вертикально вниз относительно вагона (рис. 102, а).

В то же время траектория мяча относительно наблюдателя на платформе криволинейна — мяч движется по параболе (рис. 102, б).

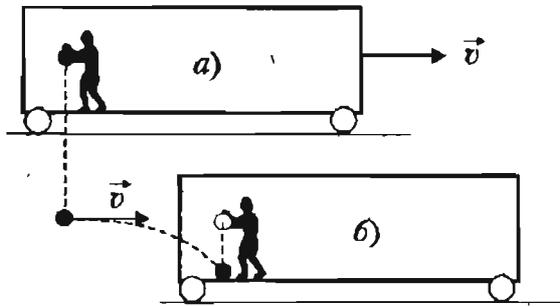


Рис. 102

**Зависимость проекции скорости от времени для прямолинейного равноускоренного движения**

Пусть векторы  $\vec{v}_0$  и  $\vec{a}$  совпадают по направлению. Совместим ось  $Ox$  системы отсчета с вектором  $\vec{v}_0$  (рис. 103). Из рисунка видно, что  $v_x = v_{0x} + a_x \cdot t$ . Если  $\vec{v}_0$  и  $\vec{a}$  имеют противоположное направление, то  $a_x < 0$ .

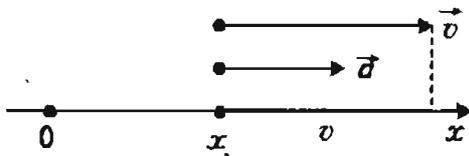


Рис. 103

Различные виды графиков зависимости скорости от времени приведены на рис. 104.

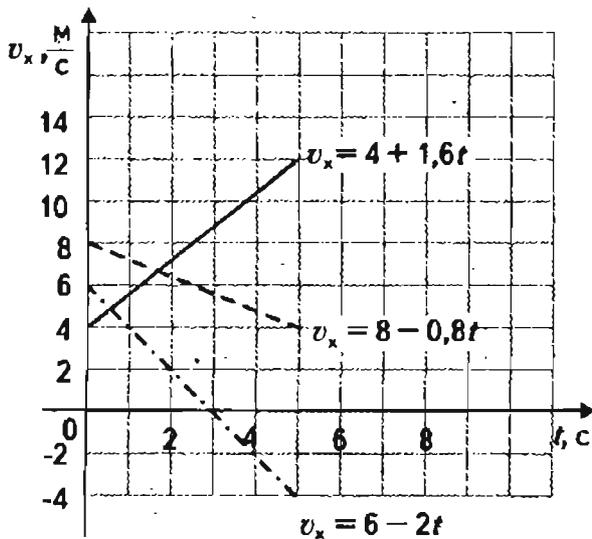


Рис. 104

**Зависимость координаты от времени для прямолинейного равноускоренного движения**

Уравнение движения можно получить графически, учитывая, что на графике  $v_x(t)$  изменение координаты  $\Delta x$  находится как площадь.

Из рис. 105; а видно, что:

$$\Delta x = v_{0x} \cdot t + a_x \cdot t \cdot \frac{t}{2} = v_{0x} \cdot t + a_x \frac{t^2}{2}.$$

Координата  $x$  через время  $t$  после начала движения равна:

$$x = \Delta x + x_0 = x_0 + v_{0x} \cdot t + a_x \frac{t^2}{2} \text{ (рис. 109, б).}$$

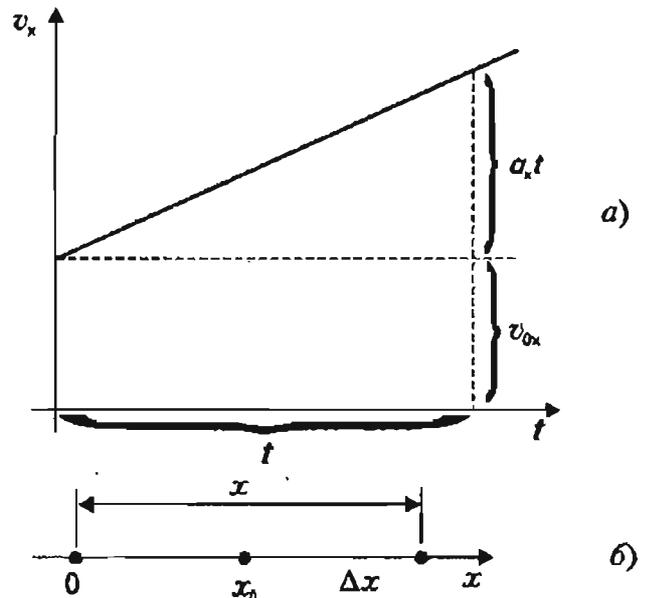


Рис. 105

Примеры уравнений движения приведены на рис. 106.

При несовпадении направлений векторов  $\vec{v}_0$  и  $\vec{a}$  движение оказывается равноускоренным криволинейным. В этом случае целесообразно одну из осей координат совмещать с вектором ускорения (рис. 107). Тогда одна из проекций вектора  $\vec{a}$  равна 0 ( $a_x = 0$  для рис. 107), что упрощает уравнения движения.

Для случая, представленного на рис. 107, следующие уравнения полностью описывают движение;

I.  $v_x = v_{0x} + a_x \cdot t = v_{0x} \tag{1}$

$v_y = v_{0y} + a_y \cdot t = v_{0y} + a \cdot t \tag{2}$

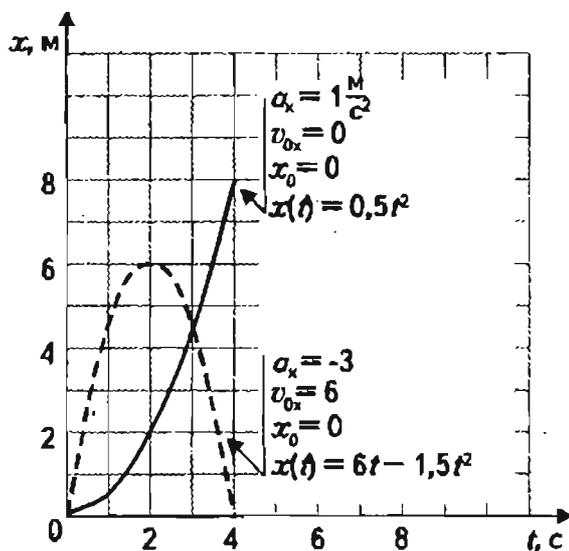


Рис. 106

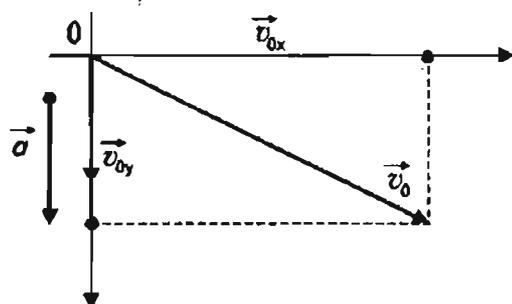


Рис. 107

II.  $x = x_0 + v_{0x} \cdot t + a_x \frac{t^2}{2} = 0 + v_{0x} \cdot t$  (3)

$y = y_0 + v_{0y} \cdot t + a_y \frac{t^2}{2} = v_{0y} \cdot t + a_y \frac{t^2}{2}$  (4)

Равноускоренные движения относительно редко встречаются в природе. Практически, можно привести лишь один пример такого движения. Это свободное падение. Оно будет специально рассмотрено в следующем разделе.

В технике равноускоренные движения встречаются чаще. Однако для их реализации необходимо строго соблюдать условия постоянства сил.

**Уровень В.** Чаще движения оказываются неравноускоренными. Наиболее просто такие движения различаются по графикам зависимости проекции скорости и координаты от времени. Первый из них отличается от прямой линии, а второй — от параболы. Однако, пользуясь графиком скорости, в

каждый момент времени можно найти проекцию ускорения, моделируя неравноускоренное движение как равноускоренное. Способ нахождения ускорения показан на рис. 108.

Графическая иллюстрация равноускоренных движений представлена в табл. 7.

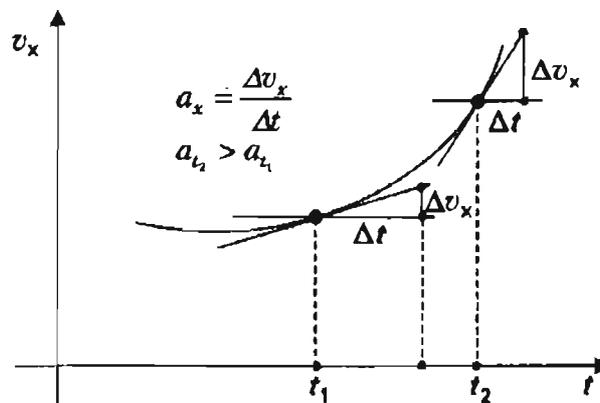


Рис. 108

*Творческие задания*

**Признаки равноускоренного прямолинейного движения**

Есть три признака, позволяющие отличить равноускоренное прямолинейное движение от неравноускоренного только на основе прямых измерений расстояния и времени. Первый из них можно применять вне зависимости от того, имеется ли у тела начальная скорость или нет.

1. *Первый признак* формулируется следующим образом. Разность расстояний  $\Delta l$ , проходимых телом за последовательные равные промежутки времени  $t_0$ , для равноускоренного движения оказывается постоянной величиной и равна:  $\Delta l = a \cdot t_0^2$  (рис. 109, а).

Докажите этот признак.

Указания:

а) запишите формулу для  $l_1 = v_{01} \cdot t + \frac{at_0^2}{2}$ ;

б) запишите формулу для  $l_2$ ;

в) замените  $v_{02}$  во второй формуле на выражение:  $v_{02} = v_{01} + a \cdot t_0$ ;

Таблица 7. Графики движений

	Равномерное движение		Равноускоренное движение		
	Формула	График	Формула	График	
				$\bar{a} \uparrow \bar{v}_0$	$\bar{a} \updownarrow \bar{v}_0$
Скорость	$\bar{v} = \frac{\bar{s}}{t}$		$\bar{v} = \bar{v}_0 + \bar{a}t$		
Ускорение	$\bar{a} = \bar{0}$		$\bar{a} = \frac{\bar{v} - \bar{v}_0}{t}$		
Перемещение	$\bar{s} = \bar{v}t$		$\bar{s} = \bar{v}_0t + \frac{\bar{a}t^2}{2}$		
Координата	$x = x_0 + v_x t$		$x = x_0 + v_0t + \frac{a_x t^2}{2}$		

г) найдите разность:

$$\Delta l = l_2 - l_1 = \left[ (v_{01} + at_0)t_0 + \frac{at_0^2}{2} \right] - \left[ v_{01}t + \frac{at^2}{2} \right];$$

е) проведите необходимые преобразования и убедитесь в том, что  $\Delta l = a \cdot t_0^2$ .

2. Два следующих признака относятся только к равноускоренному движению, в котором начальная скорость равна 0.

а) Докажите, что при равноускоренном движении без начальной скорости путь пропорционален квадрату времени:

$$s_3 : s_2 : s_1 = t_3^2 : t_2^2 : t_1^2 \text{ (рис. 109, б)}.$$

б) Докажите, что при равноускоренном движении без начальной скорости, пути, проходимые за последовательные равные промежутки времени, относятся как нечетные числа:

$$l_1 : l_2 : l_3 : l_4 = 1 : 3 : 5 : 7 \text{ (рис. 109, в)}.$$

Часто в задачах и исследованиях движения неизвестно время движения. Докажите, что:

$$v_{x2}^2 - v_{x1}^2 = 2a_x \cdot \Delta x.$$

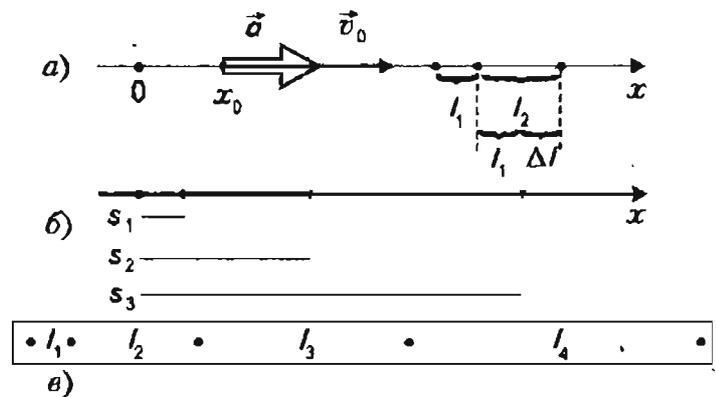


Рис. 109

Лабораторные  
работы

### Исследование равноускоренного движения

Приборы и материалы: электромагнитный прибор для изучения движения тел (рис. 110, а).

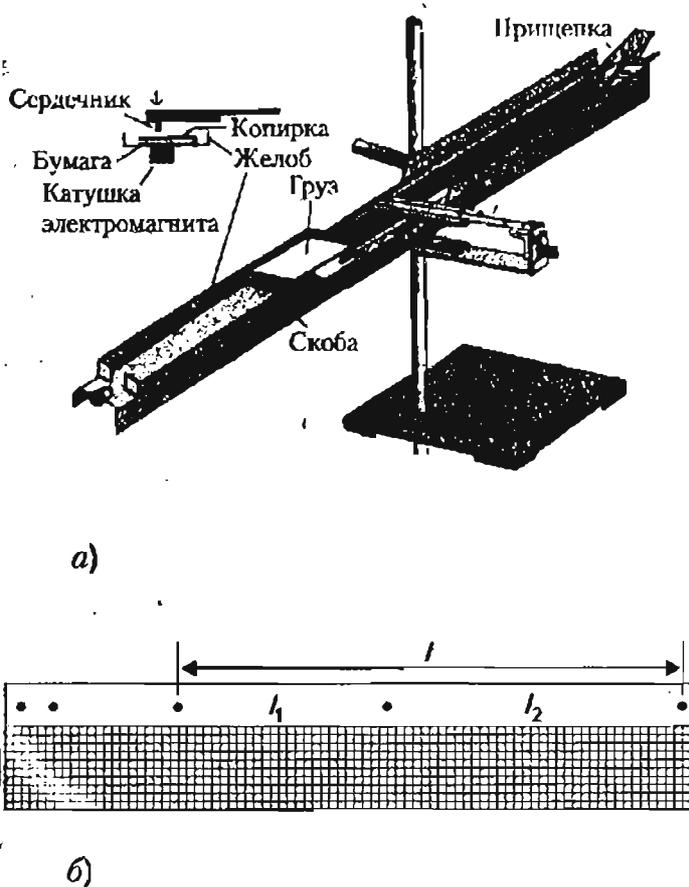


Рис. 110

Для реализации дискретных способов исследования движения тел можно использовать электромагнит, к которому подается переменное напряжение небольшой (безопасной) величины.

Якорь электромагнита колеблется с периодом 0,02 с, его боек ударяет по копировальной ленте, под которой находится полоска бумаги. Лента и бумага перемещаются вместе с бруском. На бумаге остаются метки в виде точек.

При проведении эксперимента сначала нажимается кнопка, затем освобождается лента.

- Получите с использованием прибора ленту с метками (пример такой ленты показан на рис. 110, б).
- Докажите, пользуясь любым из трех признаков, что движение бруска по наклонной плоскости является равноускоренным.
- Определите ускорение движения бруска.

### Практикум по решению задач

#### Примеры решения задач

##### Пример 1

Тело прошло за первую секунду 1 м, за вторую — 2 м, за третью — 3 м и т. д. Является ли такое движение равноускоренным?

**Решение**

Если начальная скорость  $v_0$  равна нулю, то движение тела и не равномерное (при котором  $s_1 = 1$  м;  $s_2 = 1$  м;  $s_3 = 1$  м), и не равноускоренное (при котором  $s_1 = 1$  м;  $s_2 = 3$  м;  $s_3 = 5$  м).

Однако если  $v_0 \neq 0$ , то движение может быть равноускоренным:

$$s_1 = v_0 + \frac{a}{2} = 1;$$

$$s_2 = 2v_0 + \frac{a}{2} \cdot 4 - (v_0 + \frac{a}{2}) = v_0 + \frac{3}{2}a = 2;$$

$$s_3 = 3v_0 + \frac{a}{2} \cdot 9 - (2v_0 + \frac{a}{2} \cdot 4) = v_0 + \frac{5}{2}a = 3.$$

Из этой системы уравнений следует:

$$v_0 = 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}; a = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

##### Пример 2

Расстояние между двумя железнодорожными станциями, равное  $s = 22,5$  км, поезд проходит за  $t = 25$  мин. Первые  $t_1 = 5$  мин он идет равноускоренно, а затем равнозамедленно до полной остановки. Определите ускорение поезда на пути разгона и торможения. Чему равна максимальная скорость поезда?

**Решение**

Наиболее простым является графическое решение.

На рис. 111 представлен качественный график  $v(t)$ . Площадь под графиком численно равна пройденному пути  $s$ :

$$s = \frac{vt}{2} = \frac{a_1 t_1 t}{2} \rightarrow a_1 = \frac{2s}{t_1 t}; a_1 = \frac{(2 \cdot 22,5 \cdot 10^3)}{(5 \cdot 25 \cdot 3600)} = 0,1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

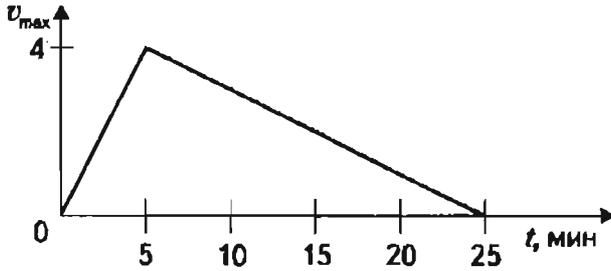


Рис. 111

Так как  $a_2 = \frac{a_1}{4}$  (это видно из графика), то

$$a_2 = 0,025 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Максимальная скорость поезда равна:

$$v_{\text{max}} = a_1 \cdot t_1 = 0,1 \cdot 300 = 30 \left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

### Пример 3

Первое тело начинает двигаться с ускорением  $a_1$ , а затем, через время  $t_1$  в течение времени  $t_2$  движется с ускорением  $a_2$ , причем,  $a_1 > a_2$ .

Второе тело первые  $t_2$  секунд двигалось с ускорением  $a_2$ , затем  $t_1$  секунд — с ускорением  $a_1$ .

Сравните модули скоростей  $v_1$  и  $v_2$  обоих тел по истечении времени  $t = t_1 + t_2$  и пути  $s_1$  и  $s_2$ , пройденные ими.

Решение (1-й способ — аналитический)

$$v_1 = a_1 \cdot t_1 + a_2 \cdot t_2; v_2 = a_2 \cdot t_2 + a_1 \cdot t_1.$$

Из этой системы уравнений следует:  $v_1 = v_2$ .

$$s_1 = \frac{a_1 t_1^2}{2} + a_1 t_1 t_2 + \frac{a_2 t_2^2}{2};$$

$$s_2 = \frac{a_2 t_2^2}{2} + a_2 t_1 t_2 + \frac{a_1 t_1^2}{2};$$

$$s_1 - s_2 = t_1 t_2 (a_1 - a_2).$$

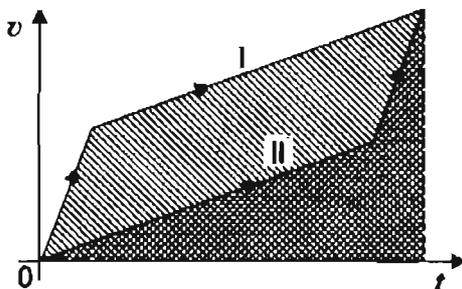


Рис. 112

Так как по условию задачи  $a_1 > a_2$ , то  $s_1 > s_2$ .

2-й способ — графический

Построим график зависимости  $v(t)$  (рис. 112). Из графика сразу видно, что  $v_1 = v_2$ . Площадь под графиком I больше площади под графиком II ( $s_1 > s_2$ ).

### Пример 4

На рис. 113 показан график зависимости проекции скорости тела на ось  $Ox$  от времени. Чему равны проекции ускорения на ось  $Ox$  в интервалах времени: 0–1 с, 1–4 с, 4–6 с? Чему равен путь, пройденный телом за 6 с? Чему равна средняя скорость тела за 6 с?

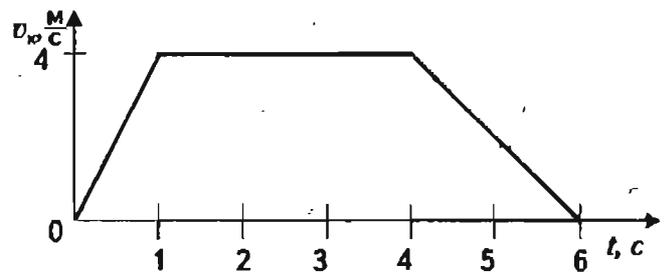


Рис. 113

Решение

Из графика на рис. 113 видно, что тело в интервале (0–1 с) двигалось равноускоренно с ускорением  $a_{x1} = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = \frac{4}{1} = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

В интервале времени (1–4 с) тело двигалось равномерно со скоростью  $v_x = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

В интервале времени (4–6 с) тело двигалось равнозамедленно с ускорением:

$$a_{x2} = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = \frac{0-4}{1} = -2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Путь, пройденный телом за 6 с, численно равен площади трапеции под графиком скорости:

$$x = \frac{3+6}{2} \cdot 4 = 18 \text{ м}.$$

Средняя скорость тела за 6 с равна:

$$v_{\text{ср}} = \frac{x}{t} = \frac{18 \text{ м}}{6 \text{ с}} = 3 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

### Пример 5

Тело движется прямолинейно вдоль оси координат  $Ox$ . На рис. 114 представлен график зависимо-

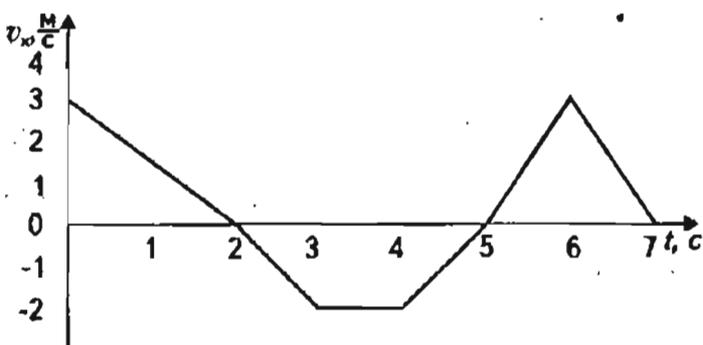


Рис. 114

сти проекции скорости на ось  $Ox$  от времени. В какой момент времени модуль перемещения тела имеет максимальное значение? Чему оно равно?

**Решение**

Перемещение может быть максимальным только в моменты времени:  $t_1 = 2$  с;  $t_2 = 5$  с;  $t_3 = 7$  с.

В момент времени  $t_1 = 2$  с;  $s_1 = \frac{3 \cdot 2}{2} = 3$  м.

В момент времени  $t_2 = 5$  с;  $s_2 = 3 - \frac{(1+3)}{2} \cdot 2 = -1$  м.

В момент времени  $t_3 = 7$  с;  $s_3 = -1 + \frac{3 \cdot 2}{2} = 2$  м.

Таким образом, модуль перемещения максимален в момент времени  $t = 2$  с и равен  $s = 3$  м.

**Пример 6**

Зависимость координаты тела от времени представлена на рис. 115, а. В какие моменты времени модуль скорости был максимален? Равен нулю?

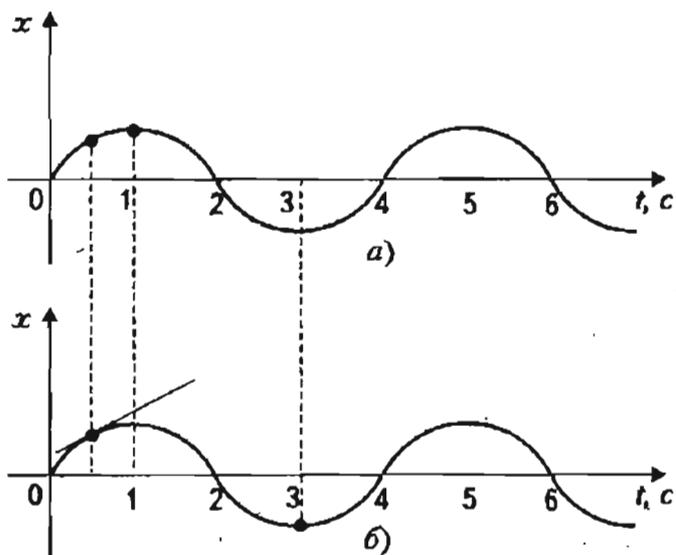


Рис. 115

Приведите примеры движения, в которых  $x(t)$  определялся бы этим рисунком.

**Решение**

«Крутизна» графика  $x(t)$  характеризует модуль скорости. Для ее определения следует провести касательную к графику в данной точке (рис. 115, б). Тангенс угла наклона касательной к графику  $x(t)$  выражает мгновенную скорость тела.

Проведя (мысленно) касательные к разным точкам графика, видим, что максимальные значения тангенса угла касательной к графику  $x(t)$ , а следовательно, и мгновенной скорости, достигаются в моменты времени: 0 с, 2 с, 4 с, 6 с. В моменты времени 1 с, 3 с, 5 с скорость тела была равна нулю.

Движение, описываемое графиком на рисунке 115, называется **колебательным**. Движение математического маятника, груза на пружине — примеры колебательного движения.

**Решить самостоятельно**

1. Автомобиль, скорость которого  $10 \frac{м}{с}$ , начал разгоняться с постоянным ускорением  $0,5 \frac{м}{с^2}$ . Чему равна скорость автомобиля через 20 с после начала ускоренного движения?
2. При торможении на прямолинейном участке дороги скорость автомобиля уменьшается от  $20 \frac{м}{с}$  до  $10 \frac{м}{с}$  в течение 5 с. Чему равен модуль ускорения автомобиля при условии, что оно во время движения оставалось постоянным?
3. На рис. 116 представлен график зависимости проекции скорости  $x$  прямолинейно движущегося тела от времени. Найдите проекцию ускорения тела  $a_x$  и проекцию его перемещения  $s_x$  за 5 с.

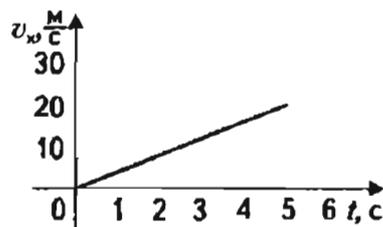


Рис. 116

4. Найдите проекцию ускорения  $a_x$  тела на ось  $Ox$  и проекцию его перемещения  $s_x$  (рис. 117).

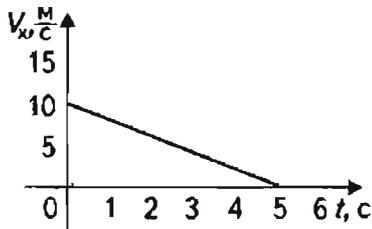


Рис. 117

5. Пост ГИБДД находится за городом на расстоянии 500 м от городской черты. Автомобиль выезжает из города и, проехав мимо поста ГИБДД со скоростью  $5 \frac{m}{c}$ , начинает разгоняться с постоянным ускорением  $1 \frac{m}{c^2}$  на прямом участке шоссе. Найдите положение автомобиля относительно городской черты через 30 с после прохождения им поста ГИБДД (рис. 118).

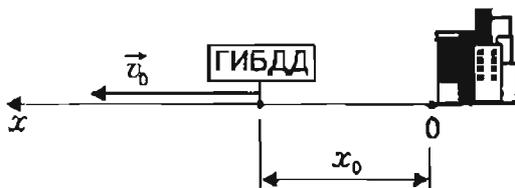


Рис. 118

6. Автомобиль двигался по прямолинейному участку шоссе с постоянной скоростью  $10 \frac{m}{c}$ . Когда машина находилась на расстоянии 100 м от светофора, водитель нажал на тормоз. После этого скорость автомобиля стала уменьшаться. Ускорение автомобиля постоянно и по модулю равно  $3 \frac{m}{c^2}$ . Найдите положение автомобиля относительно светофора через 2 с после начала торможения (рис. 119).

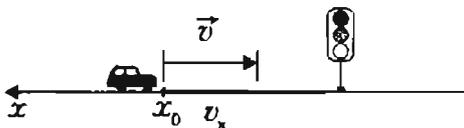


Рис. 119

7. Зависимость координат тела от времени задана уравнениями:

$$x = 0; y = t^2 + 4t + 3 \text{ (м)}; z = 0.$$

Определите начальную скорость и ускорение тела.

8. Запишите уравнения и постройте график зависимости координаты  $x$  и проекции скорости тела на ось  $Ox$  от времени, если  $a_x = 1 \frac{m}{c^2}$ ,  $x_0 = 4 \text{ м}$ ,

$$v_{0x} = -1 \frac{m}{c}.$$

9. График проекции ускорения на ось  $Ox$  движущегося тела изображен на рис. 120. Постройте график зависимости от времени проекции скорости на ту же ось, если ее значение в начальный момент времени равно  $v_0 = 4 \frac{m}{c}$ .

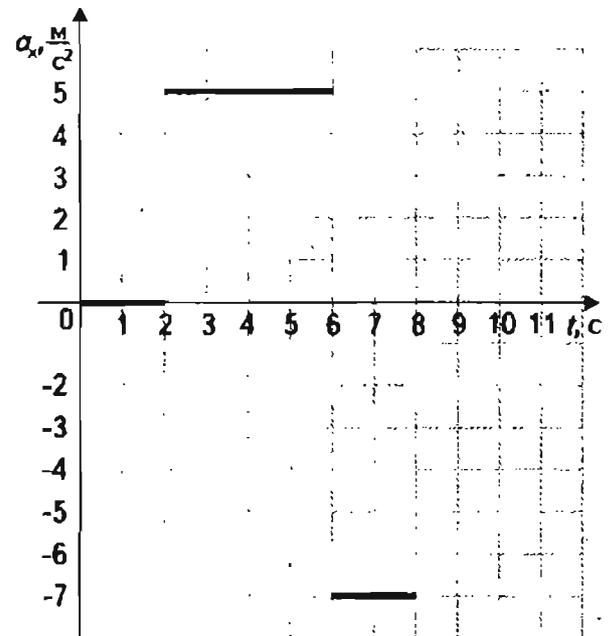


Рис. 120

10. График зависимости от времени проекции скорости движения на ось  $Oy$  изображен на рис. 121. Постройте график зависимости от времени проекции его ускорения на ту же ось.
11. График зависимости проекции скорости на ось  $Ox$  прямолинейно движущегося тела от времени изображен на рис. 122. Постройте график зависимости проекции ускорения на ось  $Ox$  и координаты  $x$  от времени.

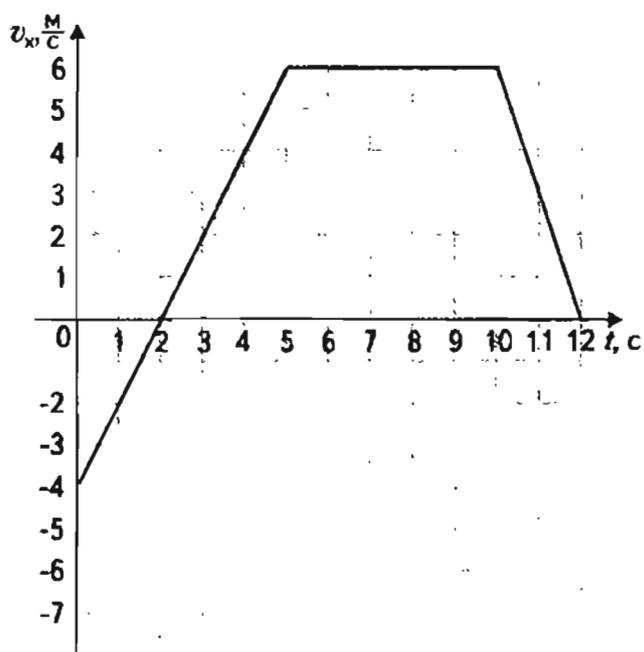


Рис. 121



Рис.123

- А)  $\rightarrow$ .                       Б)  $\leftarrow$ .  
 В)  $\vec{a} = \vec{0}$ .                     Г) Направление может быть любым.

2. По графику зависимости модуля скорости от времени, представленному на рис. 124, определите ускорение прямолинейно движущегося тела в момент времени  $t = 2$  с.

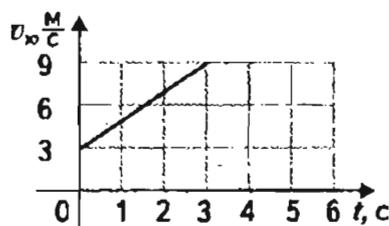


Рис. 124

- А)  $2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .                       Б)  $3 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .  
 В)  $9 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .                       Г)  $27 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

3. По условию задачи №2 определите перемещение тела за три секунды.

- А) 9 м.                               Б) 18 м.  
 В) 27 м.                             Г) 36 м.

4. Покоящееся тело начинает движение с постоянным ускорением. В третью секунду оно проходит путь 5 м. Какой путь тело пройдет за 3 с?

- А) 5 м.                               Б) 7 м.  
 В) 9 м.                               Г) 11 м.

5. Уравнение зависимости проекции скорости движущегося тела от времени:  $v_x = 2 + 3t \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)$ . Каково соответствующее уравнение проекции перемещения тела?

- А)  $s_x = 2t + 3t^2$  (м).  
 Б)  $s_x = 1,5 \cdot t^2$  (м).  
 В)  $s_x = 2t + 1,5t^2$  (м).  
 Г)  $s_x = 3t + t^2$  (м).

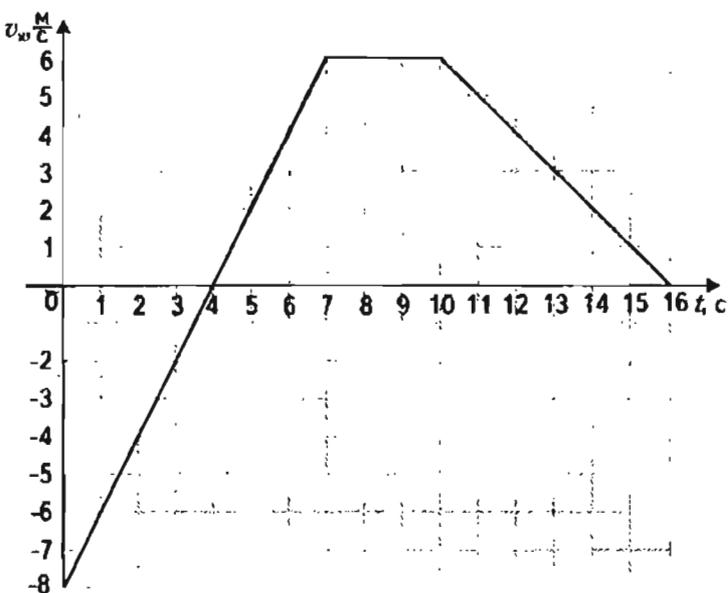


Рис. 122

Контрольные  
работы

Вариант 1

1. Скорость тела, движущегося прямолинейно и равноускоренно, изменилась при перемещении из точки 1 в точку 2 так, как показано на рис. 123. Какое направление имеет вектор ускорения на этом участке?

6. Находящемуся на горизонтальной поверхности стола бруску сообщили скорость  $5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Под действием сил трения брусок движется с ускорением  $1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . Чему равен путь, пройденный бруском за 6 с?

- А) 5 м.                       Б) 12 м.  
 В) 12,5 м.                 Г) 30 м.

### Вариант 2

1. Скорость тела, движущегося прямолинейно и равноускоренно, изменилась при перемещении из точки 1 в точку 2 так, как показано на рис. 125. Какое направление имеет вектор ускорения на этом участке?



Рис. 125

- А)  $\rightarrow$ .                       Б)  $\leftarrow$ .  
 В)  $\vec{a} = \vec{0}$ .                 Г) Направление может быть любым.

2. По графику зависимости модуля скорости от времени, представленному на рис. 126, определите ускорение прямолинейно движущегося тела в момент времени  $t = 1$  с.

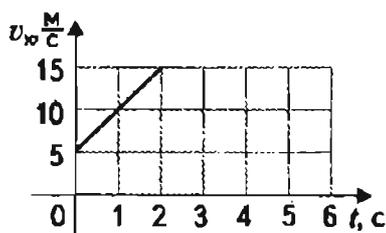


Рис. 126

- А)  $2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .                       Б)  $5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .  
 В)  $7,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .                 Г)  $30 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

3. По условию задачи №2 определите перемещение тела за две секунды.

- А) 10 м.                       Б) 20 м.  
 В) 30 м.                       Г) 40 м.

4. Покоящееся тело начинает движение с постоянным ускорением. За четыре секунды оно проходит путь 16 м. Какой путь тело пройдет за четвертую секунду?

- А) 4 м.                         Б) 7 м.  
 В) 8 м.                         Г) 9 м.

5. Уравнение зависимости проекции скорости движущегося тела от времени:  $v_x = 3 + 2t \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)$ . Каково соответствующее уравнение проекции перемещения тела?

- А)  $s_x = 2t^2$  (м).  
 Б)  $s_x = 2t + 3t^2$  (м).  
 В)  $s_x = 3t + 2t^2$  (м).  
 Г)  $s_x = 3t + t^2$  (м).

6. Находящемуся на горизонтальной поверхности стола бруску сообщили скорость  $4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Под действием сил трения брусок движется с ускорением  $1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . Чему равен путь, пройденный бруском за 5 с?

- А) 4 м.                         Б) 7,5 м.  
 В) 8 м.                         Г) 20 м.

### Контрольная работа повышенного уровня сложности

#### Вариант 1

1. Тело, двигавшееся прямолинейно и равноускоренно, прошло за первую секунду 10 м, за вторую — 20 м, за третью — 30 м и т.д. Чему равны его начальная скорость и ускорение?
2. Наблюдатель, стоящий в начальный момент движения электропоезда у первого вагона, заметил, что он прошел мимо него за 4 с. Сколько времени будет двигаться мимо него седьмой вагон? Движение считать равноускоренным.
3. Расстояние между двумя станциями, равное 36 км, поезд проходит со средней скоростью

$54 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ , причем, на разгон он тратит 2 мин; затем идет с постоянной скоростью и на снижение скорости до полной остановки тратит 1 мин. Определите наибольшую скорость движения поезда. Постройте график скорости движения поезда.

1. Точка движется прямолинейно на плоскости по закону  $x = 4(t - 2)^2$  м. Каковы начальная скорость и ускорение точки? Найдите мгновенную скорость точки в начале пятой секунды движения.

### Вариант 2

1. По наклонной доске пустили снизу вверх шарик. На расстоянии 30 см от начала пути шарик побывал дважды: через 1 с и через 2 с после начала движения. Определите начальную скорость и ускорение шарика, считая его постоянным.

2. Если мимо пассажира, стоящего на перроне, первый вагон прошел за 10 с, то за сколько времени пройдет весь поезд, состоящий из 16 вагонов, при условии, что поезд начал двигаться равноускоренно из состояния покоя?

3. Тело трогается с места и с ускорением  $1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$  проходит расстояние 12,5 м, затем оно движется равномерно в течение 15 с и до полной остановки равнозамедленно проходит 20 м. Найдите скорость и путь равномерного движения, время и ускорение равнозамедленного движения. Постройте график изменения скорости тела.

4. Зависимость координаты некоторого тела от времени выражается уравнением  $x = 10 + 4t - t^2$  (м). Каковы начальное положение тела, начальная скорость и ускорение? Через какое время тело остановится? Укажите положение тела в момент полной его остановки.

## 5. СВОБОДНОЕ ПАДЕНИЕ ТЕЛ

### Конспект.

#### Таблицы. Схемы

Свободное падение тел — это движение тел на не-большой высоте над поверхностью Земли (при высоте, значительно меньшей радиуса Земли) под действием силы тяжести.

Экспериментальные исследования показывают следующее:

- а) свободное падение — равноускоренное движение;

- б) ускорение свободного падения не зависит от массы тела;

- в) ускорение свободного падения зависит от географической широты места и изменяется в пределах от  $9,78 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$  (на полюсе) до  $9,83 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$  (на экваторе);

- г) ускорение свободного падения уменьшается с увеличением высоты.

Чаще всего пользуются значением  $9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . При грубых оценках можно пользоваться значением  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . Ускорение свободного падения обозначается символом  $g$ . Вектор  $\vec{g}$  направлен вертикально вниз.

Ускорение свободного падения уменьшается с увеличением высоты. Это видно из табл. 8.

В табл. 9 приведены значения  $g$  для некоторых городов мира; широта  $\phi$ ;  $h$  (м) — высота этого места над уровнем моря.

### Прямолинейное свободное падение

Если вектор начальной скорости  $\vec{v}_0$  направлен по вертикали, либо  $v_0 = 0$ , то свободное падение является прямолинейным движением. В этом случае применяются все формулы для равноускоренного прямолинейного движения.

### Движение тела, брошенного горизонтально (уровень Б)

Если вектор начальной скорости ( $\vec{v}_0$ ) перпендикулярен  $\vec{g}$  (рис. 127), то:

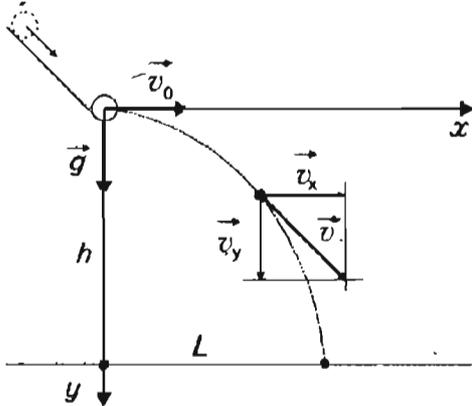


Рис. 127

В соответствии с формулами, приведенными в предыдущем разделе, можно записать четыре уравнения:

$$v_x = v_0 \quad (1);$$

$$v_y = gt \quad (2);$$

$$x = v_0 t \quad (3);$$

$$y = \frac{gt^2}{2} \quad (4).$$

Эти четыре уравнения позволяют найти скорость и координаты ( $x$ ,  $y$ ) свободно падающего тела в любой момент времени.

Таблица 8. Величина  $g$  на различных высотах

$h$ , м	$g$ , $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$	$h$ , м	$g$ , $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$
0	9,8066	11 000	9,7728
50	9,8065	12 000	9,7697
100	9,8063	13 000	9,7667
150	9,8062	14 000	9,7636
200	9,8060	15 000	9,7605
300	9,8057	16 000	9,7575
400	9,8054	17 000	9,7544
500	9,8051	18 000	9,7513
600	9,8048	19 000	9,7483
700	9,8045	20 000	9,7452
800	9,8042	25 000	9,7300
900	9,8039	30 000	9,7147
1000	9,8036	40 000	9,6844
1500	9,8020	50 000	9,6542
2000	9,8005	60 000	9,6241
3000	9,7974	70 000	9,5942
4000	9,7943	80 000	9,5644
5000	9,7912	90 000	9,535
6000	9,7882	100 000	9,505
7000	9,7851	120 000	9,447
8000	9,7820	500 000	8,45
9000	9,7789	1 000 000	7,36
10 000	9,7759	5 000 000	3,08

**Примечание.** На высотах, превышающих 5000 км, ускорение свободного падения имеет следующие значения:

$$10\,000 \text{ км} — 1,50 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}; \quad 50\,000 \text{ км} — 0,125 \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$

$$200\,000 \text{ км} — 0,0093 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}; \quad 400\,000 \text{ км} — 0,0025 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Таблица 9. Значения  $g$  в различных городах Земли

Город	$\phi$	$h$ , м	$g$ , $\frac{\text{см}}{\text{с}^2}$
Берлин	52°30'	40	981,280
Вашингтон	38°54'	14	980,118
Гринвич	51°29'	48	981,189
Мадрид	40°24,5'	655	979,981
Осло	59°55'	28	981,927
Париж	48°50'	61	980,943
Прага	50°05'	59	981,014
Рим	41°54'	49	980,367

Скорость  $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + g^2 t^2}$ .

Легко доказать, что траектория свободно падающего тела брошенного горизонтально — это парабола. Действительно, из уравнения (3) находим  $t$  и подставляем его значение в уравнение (4). Получим:

$$y = \frac{g}{2} \cdot \left( \frac{x}{v_0} \right)^2 = \frac{g}{2v_0^2} x^2 \quad (5).$$

**Экспериментальное определение начальной скорости  $v_0$  тела, брошенного горизонтально,** можно осуществить, измерив высоту  $H$  и дальность полета  $L$ . Достаточно эти значения подставить в формулу (5), и мы получим соотношение для расчета  $v_0$ .

Действительно,  $H = \frac{g}{2v_0^2} L^2$ . Отсюда,  $v_0 = L \sqrt{\frac{g}{2H}}$ .

Придумайте и осуществите опыт по измерению скорости тела, брошенного горизонтально.

### Движение тела, брошенного под углом к горизонту (уровень В)

Для свободного падения тела, брошенного под углом к горизонту (рис. 128) можно написать следующие уравнения:

$$v_x = v_0 \cos \alpha_0 \quad (1);$$

$$v_y = v_0 \sin \alpha_0 - gt \quad (2);$$

$$x = (v_0 \cos \alpha_0) \cdot t \quad (3);$$

$$y = v_0 \sin \alpha_0 t - \frac{gt^2}{2} \quad (4).$$

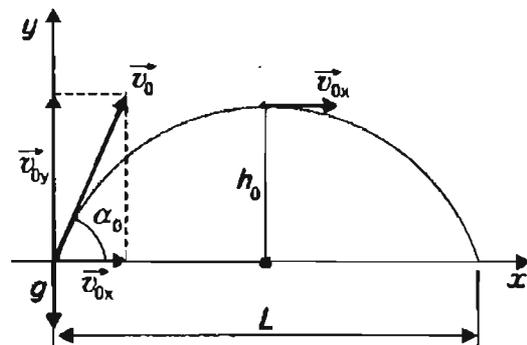


Рис. 128

### Экспериментальные исследования

а) Пользуясь стробоскопической фотографией свободно падающего тела (рис. 129), измерьте ускорение свободного падения. Время между

вспышками лампы равно  $\frac{1}{30}$  с. Длина линейки,

на фоне которой сфотографирован падающий шарик, равна 1000 мм. Оцените погрешность измерения.

б) Разработайте и осуществите эксперимент по измерению  $g$  с использованием электромагнитного прибора для изучения движения тел.

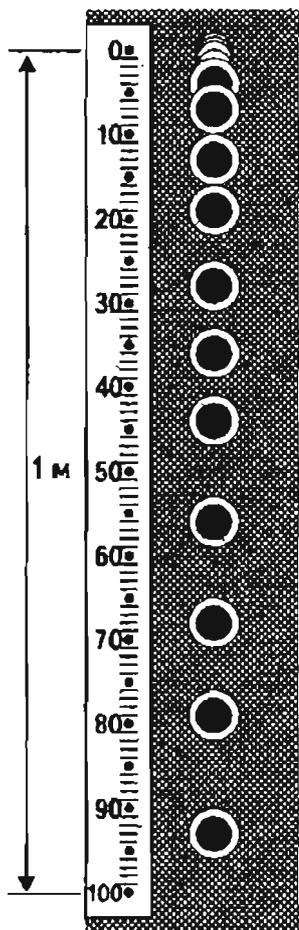


Рис. 129

### Творческие задания

Цель: исследование движения тела, брошенного под углом к горизонту.

Вывод формул для расчета дальности полета  $L$  и высоты  $H_0$ , определение вида траектории.

Указания

- Определите время подъема  $t_n$ . Тело поднимается до тех пор, пока  $v_y = 0$ .
  - Определите время движения  $t_0 = 2t_n$ .
  - Подставьте время  $t_0$  в уравнение (3) и получите формулу для расчета  $L$ .
  - Подставьте время  $t_n$  в уравнение (4) и получите формулу для расчета  $H_0$ .
2. Докажите, что тело движется по параболе.

Указания

- Выразите время  $t$  из уравнения (3).
  - Подставьте его в уравнение (4).
3. Определите моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ , когда тело было на высоте  $h < H_0$ .

Указание

Подставьте  $h$  в уравнение (4) вместо  $y$  и решите уравнение относительно  $t$ .

4. Определите скорость  $v_h$  тела на высоте  $h$ .

Указания

Скорость  $v_h^2 = v_x^2 + v_y^2$ ;  $v_x = v_{0x}$ .

Проекцию  $v_y$  можно найти из соотношения:

$$v_{0y}^2 + v_y^2 = 2gh.$$

Отсюда:  $v_y^2 = v_{0y}^2 - 2gh$ .

Итак,  $v_h^2 = (v_{0x}^2 + v_{0y}^2) - 2gh = v_0^2 - 2gh$ .

*Правила по решению задач*

### Примеры решения задач

Пример 1

Камень начинает падение без начальной скорости. Какой путь он пройдет в шестую секунду своего падения? За 6 секунд? Ускорение свободного падения принять равным  $10 \frac{м}{с^2}$ .

Решение

При равноускоренном движении без начальной скорости пройденный путь пропорционален квадрату времени. За 6 секунд камень пройдет путь:

$$H = \frac{gt^2}{2}; H = \frac{10}{2} \cdot 36 = 180 \text{ (м)},$$

а пути, пройденные за последовательные промежутки времени, относятся как последовательные нечетные числа:

$$1 : 3 : 5 : (2n - 1).$$

За первую секунду  $S_1 = 5$  м, за шестую:

$$s_5 = s_1 (2n - 1) = 5 \cdot 11 = 55 \text{ (м)}.$$

Пример

Тело свободно падает с высоты 100 м без начальной скорости. Какой путь проходит тело за после-

дно секунду своего падения? За какое время тело проходит последний метр своего пути.

**Решение**

За время  $t$  тело проходит путь  $H = \frac{gt^2}{2}$ , за время  $(t-1)$  с:

$$H_1 = \frac{g}{2}(t-1)^2 \text{ (м)}.$$

Выражая из первого уравнения  $t = \sqrt{\frac{2H}{g}}$  и подставляя во второе уравнение, получим:  $H = 60,6$  м, а числовое значение  $s = H - H_1 = 39,4$  м.

Путь  $H$  тело пролетает за время  $t_1 = \sqrt{\frac{2H}{g}}$ , путь

$(H-1)$  м — за время  $t_2 = \sqrt{2\frac{(H-1)}{g}}$  (с).

Искомое время  $\Delta t = t_1 - t_2 = 0,0226$  с.

**Пример 3**

Аэростат поднимается с поверхности Земли вертикально вверх с ускорением  $a = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . Через  $t_1 = 5$  с после начала движения аэростата из него выпал камень. Через сколько времени  $t$  этот камень долетит до Земли? Сопротивлением воздуха пренебречь. Ускорение свободного падения примите равным  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

**Решение**

Выберем ось  $Oy$  направленной вертикально вверх, а начало отсчета координаты — на поверхности Земли (рис. 130):



Рис. 130

$y = y_0 + v_0 t - \frac{gt^2}{2} = 0$ , так как в конце полета камень окажется на Земле. Подставив в квадратное уравнение значения:  $y_0 = \frac{gt_1^2}{2}$ ;  $v_0 = at_1$ , получим:  $t^2 - 2t - 5 = 0 \rightarrow t = 3,45$  с (второй корень не имеет физического смысла).

**Решить самостоятельно**

1. Камень падает с высоты 45 м без начальной скорости. Чему равно время падения и конечная скорость камня? Сопротивлением воздуха пренебречь. Ускорение свободного падения принять равным  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .
2. Какую скорость будет иметь тело при падении на поверхность Земли с высоты 20 м, если его начальная скорость равна  $15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ? Ускорение свободного падения принять равным  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .
3. Свободно падающее без начальной скорости тело за последнюю секунду падения прошло  $\frac{2}{3}$  своего пути. Чему равен весь путь, пройденный телом?
4. Камень свободно падает с высоты  $h_1 = 20$  м. В тот же момент времени другой камень был брошен с высоты  $h_2 = 30$  м вертикально вниз. Чему равна начальная скорость второго камня, если известно, что оба камня упали на поверхность Земли одновременно? Ускорение свободного падения примите равным  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . Сопротивлением воздуха пренебречь.
5. Через какое время мяч, брошенный вертикально вверх со скоростью  $30 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , будет на высоте 25 м? Ускорение свободного падения принять равным  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .
6. Начертите график зависимости от времени проекций скорости и ускорения на вертикальную ось тела, брошенного вертикально вверх с начальной скоростью  $20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Сопротивлением воздуха пренебрегите.

*Контрольные  
работы*

**Вариант 1**

1. В трубке, из которой откачан воздух, на одной и той же высоте находятся дробишка, пробка и птичье перо. Какое из этих тел быстрее достигнет дна трубки?

- А) Дробишка.  
 Б) Пробка.  
 В) Птичье перо.  
 Г) Все тела достигнут дна одновременно.

2. Чему равна скорость свободно падающего тела через 4 секунды?  $v_0 = 0 \frac{м}{с}$ , ускорение свободного падения принять равным  $10 \frac{м}{с^2}$ .

- А)  $20 \frac{м}{с}$ .                       Б)  $40 \frac{м}{с}$ .  
 В)  $80 \frac{м}{с}$ .                       Г)  $160 \frac{м}{с}$ .

3. Какой путь пройдет свободно падающее тело за 3 секунды?  $v_0 = 0 \frac{м}{с}$ , ускорение свободного падения принять равным  $10 \frac{м}{с^2}$ .

- А) 15 м.                       Б) 30 м.  
 В) 45 м.                       Г) 90 м.

4. Какой путь пройдет свободно падающее тело за пятую секунду?  $v_0 = 0 \frac{м}{с}$ , ускорение свободного падения принять равным  $10 \frac{м}{с^2}$ .

- А) 45 м.                       Б) 50 м.  
 В) 125 м.                       Г) 250 м.

5. Тело брошено вертикально вверх со скоростью  $30 \frac{м}{с}$ . Чему равна максимальная высота подъема? Ускорение свободного падения принять равным  $10 \frac{м}{с^2}$ .

- А) 22,5 м.                       Б) 45 м.  
 В) 90 м.                       Г) 180 м.

6. Тело брошено вертикально вверх со скоростью  $\bar{v}$ . Какой из представленных ниже графиков (рис. 131) зависимости проекции скорости от времени соответствует этому движению? Ось  $Oy$  направлена вертикально вверх.

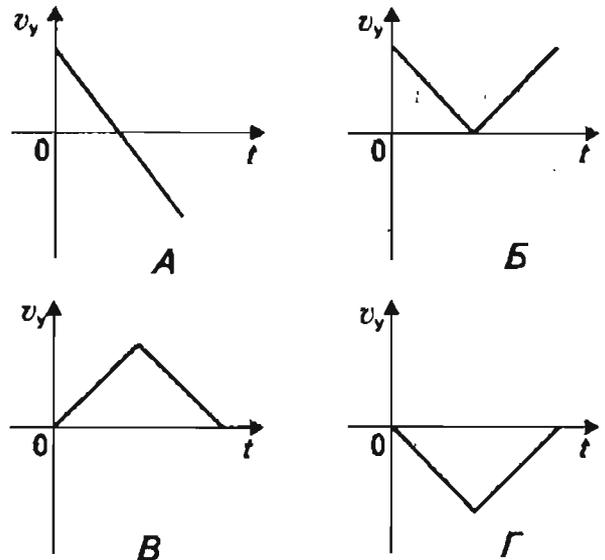


Рис. 131

- А) Г.                       Б) Б.  
 В) В.                       Г) А.

**Вариант 2**

1. В трубке, из которой откачан воздух, на одной и той же высоте находятся дробишка, пробка и птичье перо. Какое из этих тел позже всех достигнет дна трубки?

- А) Дробишка.  
 Б) Пробка.  
 В) Птичье перо.  
 Г) Все тела достигнут дна одновременно.

2. Чему равна скорость свободно падающего тела через 3 секунды?  $v_0 = 0 \frac{м}{с}$ , ускорение свободного падения принять равным  $10 \frac{м}{с^2}$ .

- А)  $15 \frac{м}{с}$ .                       Б)  $30 \frac{м}{с}$ .  
 В)  $45 \frac{м}{с}$ .                       Г)  $90 \frac{м}{с}$ .

3. Какой путь пройдет свободно падающее тело за 4 секунды?  $v_0 = 0 \frac{M}{c}$ , ускорение свободного па-

дения принять равным  $10 \frac{M}{c^2}$ .

- А) 20 м.             Б) 40 м.  
 В) 80 м.             Г) 160 м.

4. Какой путь пройдет свободно падающее тело за седьмую секунду?  $v_0 = 0 \frac{M}{c}$ , ускорение свобод-

ного падения принять равным  $10 \frac{M}{c^2}$ .

- А) 65 м.             Б) 70 м.  
 В) 245 м.            Г) 490 м.

5. Тело брошено вертикально вверх со скоростью  $20 \frac{M}{c}$ . Чему равна максимальная высота подъема? Ускорение свободного падения принять равным  $10 \frac{M}{c^2}$ .

- А) 10 м.             Б) 20 м.  
 В) 40 м.             Г) 8 м.

6. Тело брошено вертикально вверх со скоростью  $\bar{v}$ . Какой из представленных ниже графиков (рис. 132) зависимости модуля скорости от времени соответствует этому движению?

- А) Г.             Б) Б.  
 В) В.             Г) А.

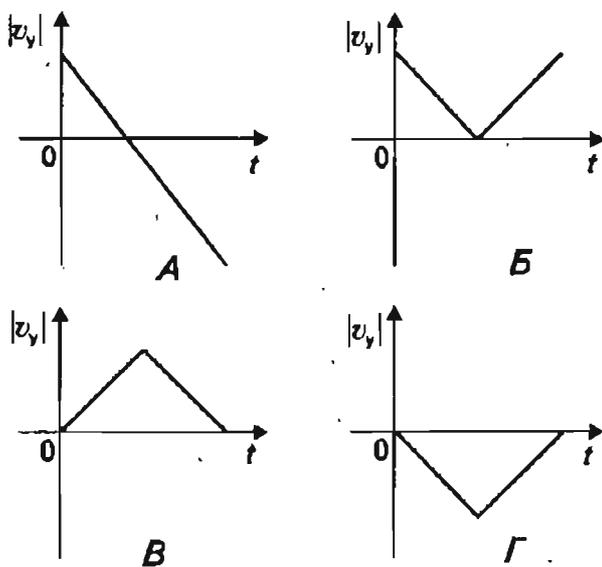


Рис. 132

### Контрольная работа повышенного уровня сложности

#### Вариант 1

1. Тело, брошенное вертикально вверх, проходит точку на высоте 10 м дважды с промежутком времени 4 с. Найдите начальную скорость тела. Сопротивлением воздуха пренебречь.
2. Тело брошено вертикально вверх с начальной скоростью  $49 \frac{M}{c}$ . Каков путь, пройденный телом по истечении 10 с от начала движения? Чему равно перемещение тела за это время?
3. Дальность полета тела, брошенного в горизонтальном направлении со скоростью  $10 \frac{M}{c}$ , равна высоте бросания. С какой высоты брошено тело?
4. Мяч брошен со скоростью  $10 \frac{M}{c}$  под углом  $30^\circ$  к горизонту. Определите горизонтальную и вертикальную составляющие скорости в начальный момент; высоту наибольшего подъема; время полета; дальность полета.

#### Вариант 2

1. Два тела начали падать с одной и той же высоты через  $\tau$  секунд одно после другого. Через сколько секунд расстояние между ними будет равно  $d$ ?
2. Стрела выпущена из лука вертикально вверх со скоростью  $39,2 \frac{M}{c}$ . Через сколько времени от начала движения она упадет обратно? На какую высоту она поднимется? Найдите перемещение и путь стрелы за 5 с движения. Сопротивлением воздуха пренебречь.
3. Самолет летит в горизонтальном направлении на высоте 10 км со скоростью  $720 \frac{KM}{ч}$ . На каком расстоянии от цели (по горизонтали) летчик должен сбросить бомбу, чтобы попасть в цель? Какова скорость бомбы в момент поражения цели?
4. Мяч брошен со скоростью  $20 \frac{M}{c}$  под углом  $60^\circ$  к горизонту. Определите горизонтальную и вертикальную составляющие скорости в начальный момент; высоту наибольшего подъема; время полета; дальность полета.

## 6. КИНЕМАТИКА ДВИЖЕНИЯ ПО ОКРУЖНОСТИ

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

Движение точки по окружности, вращение твердого тела вокруг закрепленной или незакрепленной оси имеют важнейшее значение в технике, широко распространены в природе.

Невозможно найти машину, механизм, устройство, не содержащие вращающихся деталей: они есть в автомобиле, самолете, музыкальном центре, магнитофоне, компьютере. В космосе вращаются планеты, астероиды, звезды.

Важность движения по окружности состоит еще в том, что движение по любой сложной кривой может быть представлено как движение по дугам окружностей. Поэтому часто используется понятие **радиус кривизны**  $\rho$ . Радиус кривизны — радиус той окружности, которая наилучшим образом совпадает с траекторией в данной точке (рис. 133).

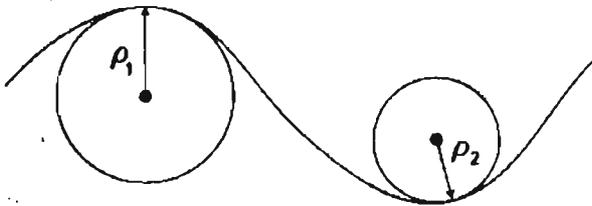


Рис. 133

### Движение по окружности со скоростью, постоянной по модулю

Пусть точка движется по окружности радиусом  $R$  с постоянной по модулю скоростью (рис. 134). Период обращения  $T$  — промежуток времени, через который точка вернется в первоначальное положение.

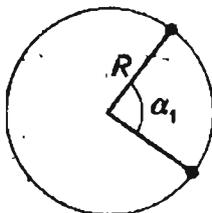


Рис. 134

Скорость движения точки можно найти из соотношения:

$$v = \frac{2\pi R}{T} = \frac{2\pi}{T} R.$$

Отношение  $\frac{2\pi}{T}$  определяет центральный угол  $\phi$ , на который поворачивается отрезок, соединяющий точку с центром, за 1 секунду. Это отношение называется **угловой скоростью**:  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ;  $[\omega] = \frac{1}{c}$ . Ясно, что  $v = \omega \cdot R$ .

Движение по окружности со скоростью, постоянной по модулю, является ускоренным. Это связано с тем, что при постоянном модуле направление скорости все время изменяется.

Вектор ускорения при движении по окружности радиуса  $R$  с постоянной по модулю скоростью  $v$  обладает двумя свойствами:

а) вектор ускорения в любой точке окружности перпендикулярен вектору скорости и направлен к центру окружности. Поэтому такое ускорение часто называется **центростремительным**;

б) модуль ускорения равен:  $a = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$ .

Первое свойство вектора ускорения объясняется на рис. 135. Если точка прошла очень малый путь, то этот путь почти не отличается от длины хорды, а  $\Delta \vec{v}$  образует с  $v$  почти прямой угол. Из подобия

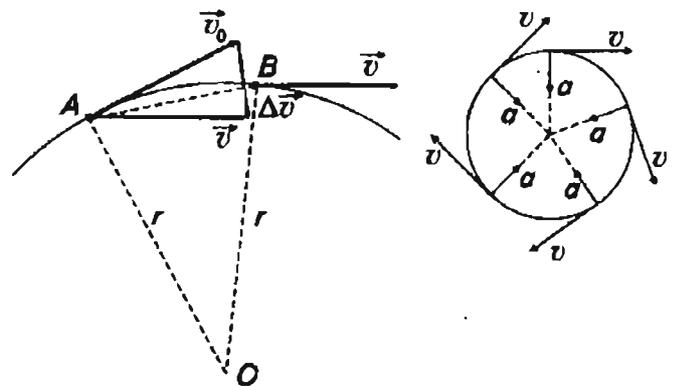


Рис. 135

треугольника  $AOB$  и треугольника, образованного векторами  $\vec{v}_0$ ,  $\vec{v}$  и  $\Delta\vec{v}$ , можно написать:  $\frac{\Delta v}{AB} = \frac{v}{r}$ .

Достаточно учесть, что  $AB = v \cdot t$  и  $a = \frac{\Delta v}{t}$ , и мы получим:  $\frac{\Delta v}{ut} = \frac{v}{r}$ .

Отсюда и следует, что  $\frac{\Delta v}{t} = a = \frac{v^2}{r}$ .

Часто точки движутся по окружности со скоростью, переменной по модулю.

**Уровень В.** Представьте себе автомобиль, который ижется по шоссе ускоренно. В этом случае точки его колес будут двигаться по окружности со скоростью, модуль которой увеличивается (рис. 136, а). При торможении автомобиля модуль скорости будет уменьшаться (рис. 136, б).

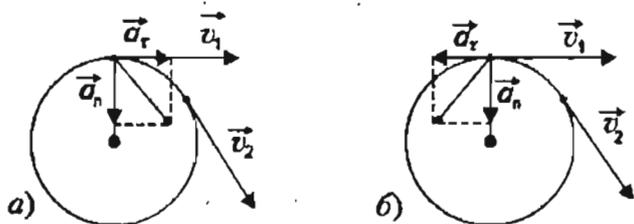


Рис. 136

Ускорение движения точки в этих случаях обеспечивает изменение направления скорости и изменение модуля скорости.

Первая составляющая называется **нормальным ускорением**  $\vec{a}_n$ ,  $a_n = \frac{v^2}{R}$ .

Вторая составляющая называется **тангенциальным ускорением**  $\vec{a}_\tau$ . Вектор  $\vec{a}_\tau$  совпадает по направлению со скоростью при увеличении модуля скорости и противоположен ей при уменьшении модуля скорости.

Полное ускорение равно:  $\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau$ .

Представление об  $\vec{a}_n$  и  $\vec{a}_\tau$  оказывается полезным и при криволинейном движении (рис. 137). Именно составляющая  $\vec{a}_n$  позволяет определить радиус кривизны:

$$\vec{a}_n = \frac{v^2}{\rho} \rightarrow \rho = \frac{v^2}{a_n}$$

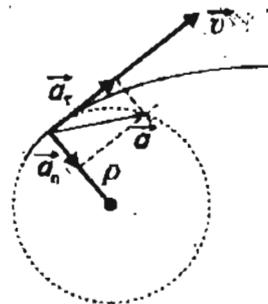


Рис. 137

В качестве примера можно привести свободное падение тела, брошенного под углом к горизонту (рис. 138).

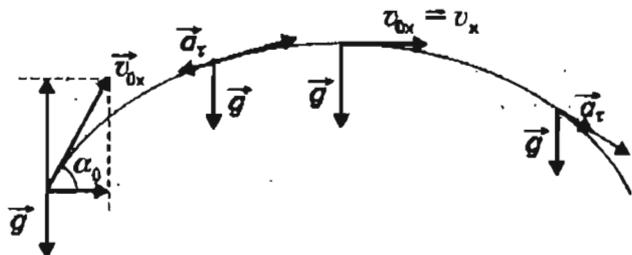


Рис. 138

Полное ускорение  $\vec{a}_n + \vec{a}_\tau$  всюду равно  $\vec{g}$ , но на восходящей части траектории  $a_\tau = g \cdot \sin\alpha$ ; векторы  $\vec{a}_\tau$  и  $\vec{v}$  имеют противоположные направления, а на нисходящей части траектории векторы  $\vec{a}_\tau$  и  $\vec{v}$  совпадают по направлению.

В любой точке параболы мы имеем возможность определить радиус ее кривизны из соотношения:

$$g \cdot \sin\alpha = \frac{v^2}{\rho}$$

В частности, в вершине параболы:  $\rho_0 = \frac{(v_0 \cos\alpha_0)^2}{g}$

**Обобщающая схема (схема 7)**

На схеме 7 представлена классификация видов движения по окружности. Ее левая часть позволит вам понять внешне противоречивые соотношения:

$a = \frac{v^2}{R}$  и  $a = \omega^2 R$ . Согласно первому из них, ускорение обратно пропорционально  $R$ , а согласно второму — прямо пропорционально  $R$ .

Пример с велосипедом показывает, что  $a \sim \frac{1}{R}$ , если скорость двух точек одинакова, и  $a \sim R$ , если угловая скорость одинакова.

В правой части таблицы показано неравномерное движение по окружности. Целесообразно обратить внимание на то, что при увеличении скорости изменяется и нормальное, и полное ускорение.

### Лабораторные работы

## Изучение равномерного движения точки по окружности

Вариант выполнения

Приборы и материалы: нитка, грузик, секундомер, линейка.

- а) Сборка измерительной установки. К книжной полке прикрепите нить длиной 0,5 м, к концу нити привяжите грузик и, взявшись двумя пальцами около точки прикрепления нити, научитесь вращать его равномерно по окружности.

Окружность радиуса  $R = 10-15$  см начертите на листе бумаги под грузиком (рис. 139).

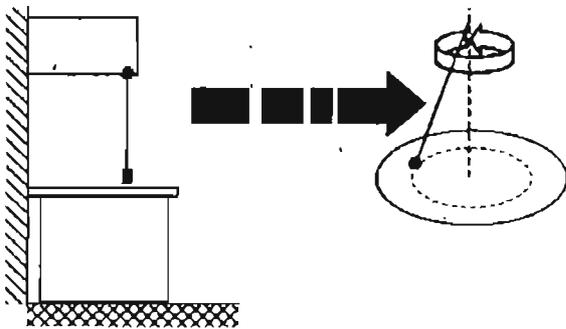


Рис. 139

- б) Проведение измерений. Измерьте время  $t$  определенного числа  $N$  (30–50) полных оборотов, определите период обращения  $T = \frac{t}{N}$ , скорость, угловую скорость и центростремительное ускорение  $a_{\text{цс}}$ .

### Практикум по решению задач

## Примеры решения задач

### Пример 1

Сравните модуль центростремительного ускорения тела на экваторе, возникающего при его суточном вращении вокруг земной оси, с центростремительным ускорением, возникающим при его годовом движении вместе с Землей вокруг Солнца. Радиус Земли примите равным  $R_1 = 6,4 \cdot 10^6$  м, радиус земной орбиты  $R_2 = 1,5 \cdot 10^{11}$  м.

Решение

$$a_1 = \frac{4\pi^2}{T_1^2} R_1,$$

где  $T_1 = 1$  сутки = 86 400 с.

Подставляя численное значение, получим:

$$a_1 = 0,034 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

$$a_2 = \frac{4\pi^2}{T_2^2} R_2,$$

где  $T_2 = 1$  год =  $3 \cdot 10^7$  с.

Подставляя численное значение, получим:

$$a_2 = 0,006 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Следовательно:  $\frac{a_1}{a_2} = 5,7$ .

### Пример 2

Самолет выполняет «петлю Нестерова» в вертикальной плоскости, двигаясь с постоянной по модулю скоростью. Определите минимальное значение скорости движения самолета при заданном радиусе «петли» ( $R_0 = 90$  м) и максимальное значение радиуса «петли» при заданной скорости движения самолета ( $v_0 = 100 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ).

Решение

Находим центростремительное ускорение самолета. В верхней части «петли Нестерова» это ускорение не может быть меньше ускорения свободного падения:  $a_{\text{цс}} \geq g$ . Следовательно,  $g \leq \frac{v^2}{R}$ . При заданном радиусе петли  $R_0$  скорость самолета долж-

СХЕМА 7

Кинематика движения по окружности

Модуль скорости не изменяется

Модуль скорости изменяется

Скорость

$$v = \frac{2\pi R}{T}$$

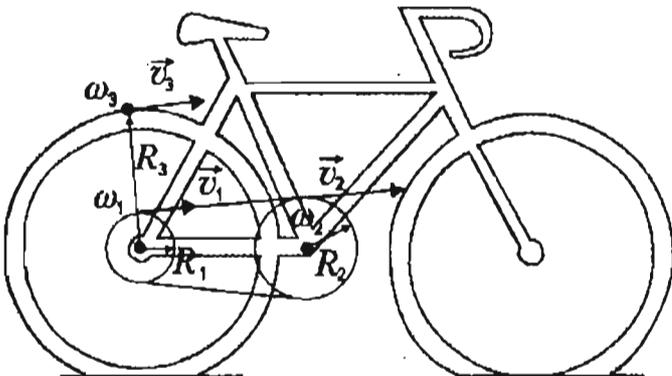
Угловая скорость

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Ускорение  $a_{uc} = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$

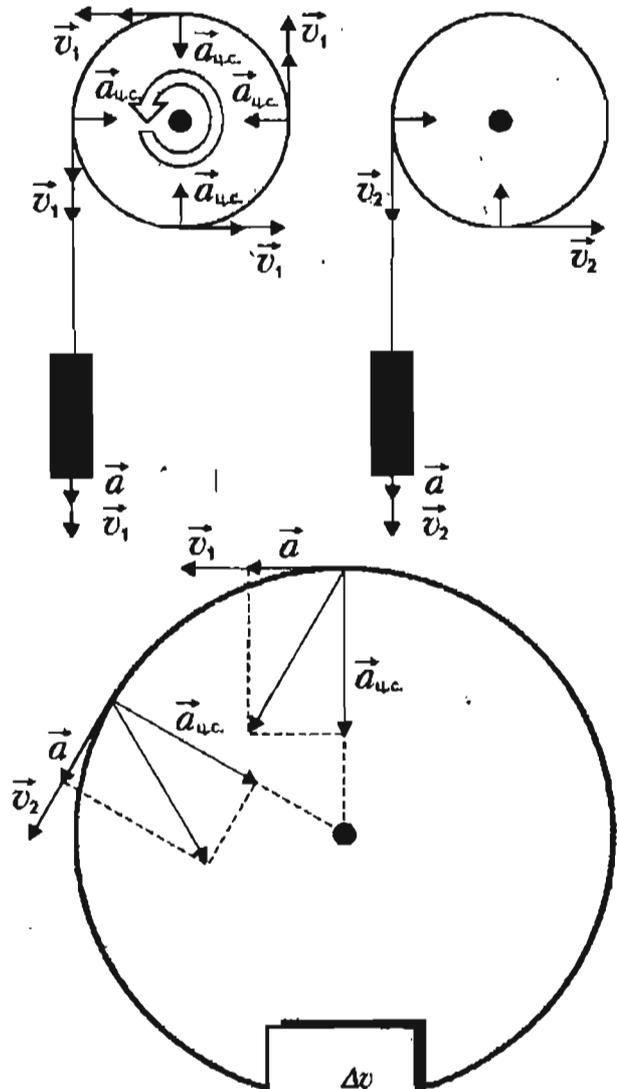
$$a = \frac{v^2}{R}$$

$$a = \omega^2 R$$



$$\begin{aligned} v_1 &= v_2 = v \\ a_1 &= \frac{v^2}{R_1} \\ a_2 &= \frac{v^2}{R_2} \\ \frac{a_1}{a_2} &= \frac{R_2}{R_1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \omega_2 = \omega \\ a_1 &= \omega^2 R_1 \\ a_2 &= \omega^2 R_2 \\ \frac{a_1}{a_2} &= \frac{R_1}{R_2} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} a &= \frac{\Delta v}{\Delta t} \\ a_{uc} &= \frac{v^2}{R} \end{aligned}$$

на быть больше некоторого минимального значения:  $v_{\min} = \sqrt{gR_0}$ ,

$$v_{\min} = \sqrt{10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 90 \text{ м}} = 30 \frac{\text{М}}{\text{с}}.$$

При заданной скорости движения самолета  $v_0$  радиус «петли» должен быть меньше некоторого максимального значения:

$$R_{\max} = \frac{v_0^2}{g} = \frac{\left(100 \frac{\text{М}}{\text{с}}\right)^2}{10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}} = 1000 \text{ м}.$$

### Пример 3

Мальчик вращает в вертикальной плоскости камень на нити длиной  $l = 2$  м. После обрыва нити камень летит вертикально вверх. На какую максимальную высоту поднимется камень, если в момент его отрыва полное ускорение камня было направлено под углом  $45^\circ$  к вертикали (рис. 140).

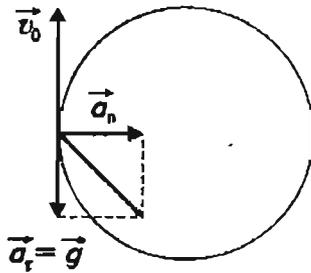


Рис. 140

### Решение

Из рисунка видно, что  $a_{\text{ц}} = g$ ,

$$\frac{v_0^2}{l} = g \quad (1).$$

$$\text{Учтя, что } H_{\max} = \frac{v_0^2}{2g} \quad (2),$$

из выражений (1) и (2) находим:

$$H_{\max} = \frac{l}{2} = 0,6 \text{ м}.$$

### Решить самостоятельно

1. Мальчик вращает в вертикальной плоскости резиновую пробку на нити длиной  $l = 0,6$  м с постоянной по модулю скоростью. При отпуске нити пробка полетела вертикально вверх и поднялась на высоту  $h = 1,8$  м. Определите модуль вектора скорости и центростремительного ускорения пробки в момент времени перед отпуском нити. Ускорение свободного падения примите равным  $10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$ .
2. Какую скорость должен иметь искусственный спутник Земли при движении по круговой орбите на высоте  $h = 200$  км над поверхностью Земли? Ускорение свободного падения на этой высоте  $g = 9,2 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$ .
3. Согласно модели атома, созданной Резерфордом, электрон в атоме водорода движется по круговой орбите вокруг ядра с постоянной скоростью. Определите центростремительное ускорение электрона, если радиус орбиты  $R = 0,5 \cdot 10^{-10}$  м, а скорость электрона на этой орбите  $v = 2,2 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ .
4. Для ускорения тяжелых заряженных частиц применяют циклотрон — ускоритель, в котором заряженная частица движется в вакууме по траектории, состоящей из полуокружностей возрастающего радиуса. На прохождении каждой последующей полуокружности частица затрачивает одинаковое время, т. е. период обращения остается постоянным. Определите радиус ускорительной камеры и центростремительное ускорение протона, если известно, что период обращения протона в камере циклотрона  $T = 6,6 \cdot 10^{-8}$  с. Скорость протона при вылете из ускорительной камеры  $v = 6 \cdot 10^7 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ .
5. Велосипедист едет по закруглению велотрека радиусом  $R = 35$  м. Двигаясь равноускоренно, за  $t = 10$  с он увеличил свою скорость от  $v_1 = 10 \frac{\text{М}}{\text{с}}$  до  $v_2 = 15 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ . Определите касательное, центростремительное и полное ускорения велосипедиста в конце десятой секунды разгона. Укажите направления векторов ускорений.

Контрольные  
работы

Вариант 1

1. Тело движется равномерно по окружности в направлении по часовой стрелке. Как направлен вектор ускорения при таком движении (рис. 141)?

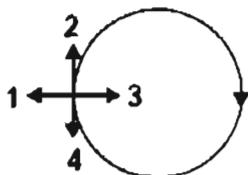


Рис. 141

- А) 1.                       Б) 2.  
 В) 3.                       Г) 4.

2. Автомобиль движется на повороте по круговой траектории радиусом 50 м с постоянной по модулю скоростью  $10 \frac{м}{с}$ . Каково ускорение автомобиля?

- А)  $1 \frac{м}{с^2}$ .                       Б)  $2 \frac{м}{с^2}$ .  
 В)  $5 \frac{м}{с^2}$ .                       Г)  $0 \frac{м}{с^2}$ .

3. Тело движется по окружности радиусом 10 м. Период его обращения равен 20 с. Чему равна скорость тела?

- А)  $2 \frac{м}{с}$ .                       Б)  $\pi \frac{м}{с}$ .  
 В)  $2\pi \frac{м}{с}$ .                       Г)  $4\pi \frac{м}{с}$ .

4. Тело движется по окружности радиусом 5 м со скоростью  $20 \frac{м}{с}$ . Чему равна частота обращения?

- А)  $\frac{2}{\pi} с^{-1}$ .                       Б)  $2\pi с^{-1}$ .  
 В)  $2\pi^2 с^{-1}$ .                       Г)  $0,5 с^{-1}$ .

5. Две материальные точки движутся по окружностям радиусами  $R_1 = R$  и  $R_2 = 2R$  с одинаковыми скоростями. Сравните их центростремительные ускорения.

- А)  $a_1 = a_2$ .                       Б)  $a_1 = 2a_2$ .  
 В)  $a_1 = \frac{a_2}{2}$ .                       Г)  $a_1 = 4a_2$ .

6. Автомобиль движется с постоянной по модулю скоростью по траектория, представленной на рис. 142. В какой из указанных точек траектории центростремительное ускорение минимально?

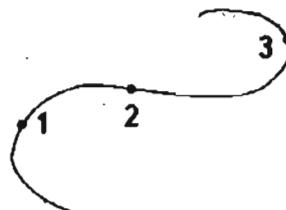


Рис. 142

- А) 1.  
 Б) 2.  
 В) 3.  
 Г) Во всех точках одинаково.

Вариант 2

1. Тело движется равномерно по окружности в направлении против часовой стрелки. Как направлен вектор ускорения при таком движении (рис. 143)?

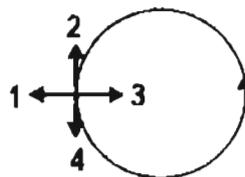


Рис. 143

- А) 1.                       Б) 2.  
 В) 3.                       Г) 4.

2. Скорость крайних точек точильного круга радиусом 10 см равна  $60 \frac{м}{с}$ . Чему равно их центростремительное ускорение?

- А)  $6 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .       Б)  $360 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .
- В)  $3600 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .       Г)  $36\,000 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .
3. Тело движется по окружности радиусом 5 м. Период его обращения равен 10 с. Чему равна скорость тела?
- А)  $4\pi \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .       Б)  $2\pi \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .
- В)  $\pi \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .       Г)  $2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .
4. Тело движется по окружности радиусом 3 м со скоростью  $12 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Чему равна частота обращения?
- А)  $0,5 \text{ с}^{-1}$ .       Б)  $2 \text{ с}^{-1}$ .
- В)  $\frac{2}{\pi} \text{ с}^{-1}$ .       Г)  $2\pi^2 \text{ с}^{-1}$ .
5. Две материальные точки движутся по окружности радиусами  $R_1 = R$  и  $R_2 = 2R$  и с одинаковыми периодами. Сравните их центростремительные ускорения.
- А)  $a_1 = a_2$ .       Б)  $a_1 = 2a_2$ .
- В)  $a_1 = \frac{a_2}{2}$ .       Г)  $a_1 = \frac{a_2}{4}$ .
6. Автомобиль движется с постоянной по модулю скоростью по траектории, представленной на рис. 144. В какой из указанных точек траектории центростремительное ускорение максимально?

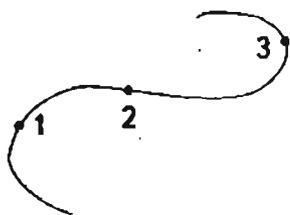


Рис. 144

- А) 1.       Б) 2.
- В) 3.       Г) Во всех точках одинаково.

### Контрольная работа повышенного уровня сложности

#### Вариант 1

- Стержень длиной 0,5 м вращается вокруг перпендикулярной к нему оси, при этом один его конец движется с линейной скоростью  $0,314 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Найти линейную скорость другого конца стержня относительно оси вращения, если частота вращения  $0,5 \text{ с}^{-1}$ . Сравните центростремительные ускорения концов стержня.
- Горизонтально летевшая пуля пробила вращающийся с частотой  $100 \text{ с}^{-1}$  вертикальный барабан по его диаметру, равному 1 м. Какова скорость пули внутри барабана, если расстояние по окружности между пробоинами в нем оказалось равным 0,942 м.
- Найти период, частоту и угловую скорость секундной, минутной и часовой стрелок часов в единицах СИ. Во сколько раз угловая скорость секундной стрелки часов больше угловой скорости вращения Земли вокруг своей оси?
- Тело брошено со скоростью  $20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  под углом  $60^\circ$  к горизонту. Определите полное, нормальное и тангенциальное ускорения в точке бросания; радиус кривизны параболы в верхней точке.

#### Вариант 2

- Диск проигрывателя вращается с частотой  $78 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ . Определите среднюю скорость перемещения иглы от края пластинки к ее центру, если на ней имеется 230 бороздок, а расстояние между крайними бороздками 60 мм.
- В опыте по определению ускорения свободного падения один раз шарик падает с высоты 0,5 м на неподвижный горизонтально расположенный диск, другой раз — с той же высоты на тот же диск, вращающийся с частотой  $2 \text{ с}^{-1}$ , при этом диск успевает повернуться относительно оси вращения на угол  $230^\circ$ . Определите ускорение свободного падения шарика.

3. Как изменится линейная скорость при движении материальной точки по окружности, если угловую скорость увеличить в два раза, а расстояние от точки до оси вращения уменьшить в четыре раза?
4. Тело брошено со скоростью  $20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  под углом  $45^\circ$  к горизонту. Определите радиус кривизны параболы в точке, в которой тело окажется через 1 с полета.

*Творческие  
задания*

Положите на край стола монету и легким щелчком запустите ее горизонтально.

Измерьте высоту стола, дальность полета.

Рассчитайте начальную и конечную скорости, полное, нормальное и тангенциальное ускорения в момент отрыва монеты от стола и при падении ее на пол; определите радиус кривизны параболы в эти моменты времени.



### Изучив эту тему,

- ♦ вы узнаете три закона динамики, формулы для расчета сил трения, упругости, всемирного тяготения, методы решения динамических задач;
- ♦ поймете, что сила — причина изменения скорости, почему при свободном падении ускорение тел одинаково, что законы физики имеют границы применимости, что вес тела можно изменять;
- ♦ научитесь пользоваться методами решения динамических задач, измерять силы, жесткость пружин, определять границы применимости законов, тормозной путь и время торможения

### Основные понятия и законы:

Взаимодействие тел • Сила • Масса • Правило сложения сил • Мера инертности • Принцип относительности • Закон всемирного тяготения • Ускорение свободного падения • Деформация • Жесткость • Вес тела • Невесомость • Сила трения • Момент силы • Плечо силы • Равновесие тел

## 1. ВВЕДЕНИЕ

*Конспект.*

*Таблицы. Ссылки*

### Классическая механика — что это такое?

Первая теория в истории физики — теория механического движения тел. Она основывается, главным образом, на представлениях и законах механического движения, сформулированных еще в 1687 г. И. Ньютоном в книге «Математические принципы натуральной философии» (*I. Newton. Philosophiæ naturalis principia mathematica, 1687*).

Основные понятия механики, ее идеи в определенной мере знакомы вам. Вы имеете представления о массе, силе, можете привести примеры взаимодействия тел, можете назвать основные виды сил (трения, упругости, всемирного тяготения).

Современная наука называет механику, построенную на идеях Ньютона, «классической механикой». Прилагательное «классическая» (лат. *classic* — образец) присвоено ньютоновской механике потому, что ее построение (структура) служило образцом для ученых при создании других физических теорий.

Законы классической механики позволяют выполнить расчеты траекторий космических аппаратов и тормозного пути автомобиля, объяснить возникновение приливов и отливов. Даже при проектировании компьютеров приходится пользоваться законами классической механики.

Вторая причина названия «классическая механика» связана с определением границ применимости механики, созданной гениальным И. Ньютоном. Вы уже знаете, что такие границы имеет всякая теория. Для механики они были определены после создания электродинамики и квантовой механики. После знакомства с этими теориями границы «раздела» между ними вам будут более ясны.

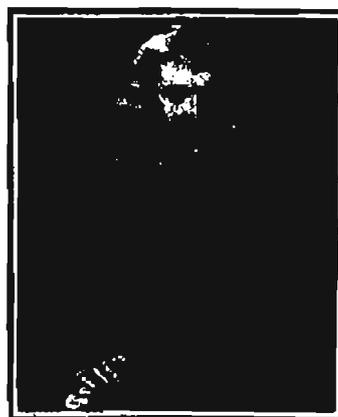
Сейчас же укажем, что классическая механика не позволяет объяснить явления, происходящие с телами и частицами, скорость которых приближается к

скорости света в вакууме  $c = 300000 \frac{\text{км}}{\text{с}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Классическая механика не может правильно описать движение частиц, находящихся в ядре атома (протоны, нейтроны), а также электронов, движущихся вокруг ядра. Указанные границы применимости были обнаружены в начале XX в. Таким об-

разом, термин «классическая» обозначает именно то, что есть еще «другая» механика — теория движения очень быстрых частиц и квантовая механика — теория движения атомных частиц.

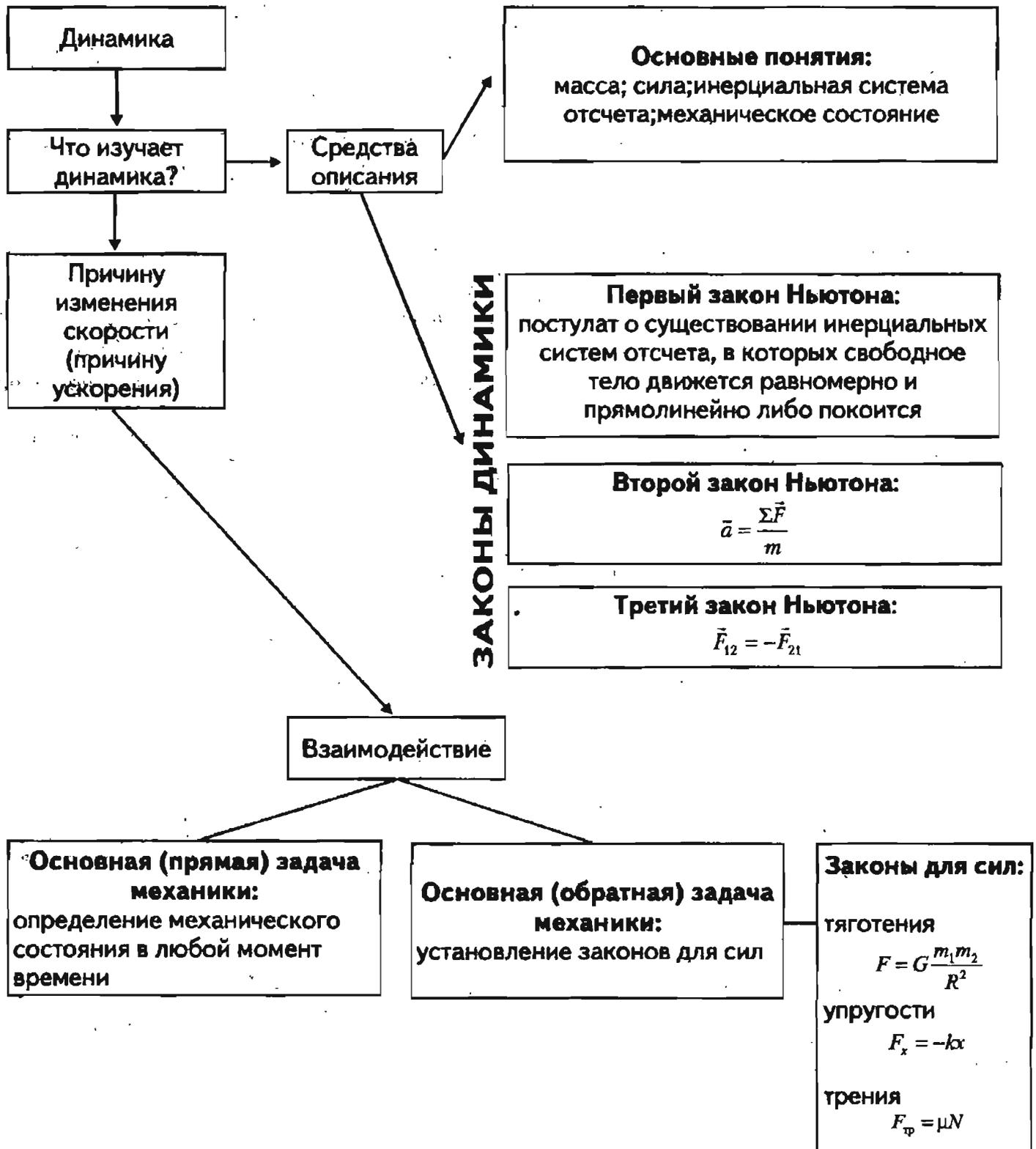
Внутри же границ применимости классическая механика позволяет объяснить все разнообразие механических явлений, обнаруженных за последние триста лет. Она служит научной базой для создания огромного разнообразия машин, механизмов, технических устройств, основанных на движениях тел — от обычного велосипеда до космической ракеты.



**Ньютон Исаак (1643–1727)** — английский физик и математик. Им открыты основные законы движения тел и закон тяготения, открыты и изучены многие важные свойства света; разработаны важнейшие разделы высшей математики.

## СХЕМА 8

## Структура и содержание динамики



## 2. ВЗАМОДЕЙСТВИЕ ТЕЛ. СИЛА. МАССА. СЛОЖЕНИЕ СИЛ. ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Конспект.

Таблицы. Схемы

Наблюдения показывают, что все тела взаимодействуют друг с другом. Такое взаимодействие обнаруживается по взаимному влиянию тел друг на друга. Механика изучает, главным образом, два типа такого влияния. При взаимодействии двух тел оба они: во-первых, изменяют свою форму (деформируются, рис. 145); во-вторых, изменяют свою скорость, приобретают ускорение (рис. 146). Взаимодействие тел — причины их деформации и ускорения.

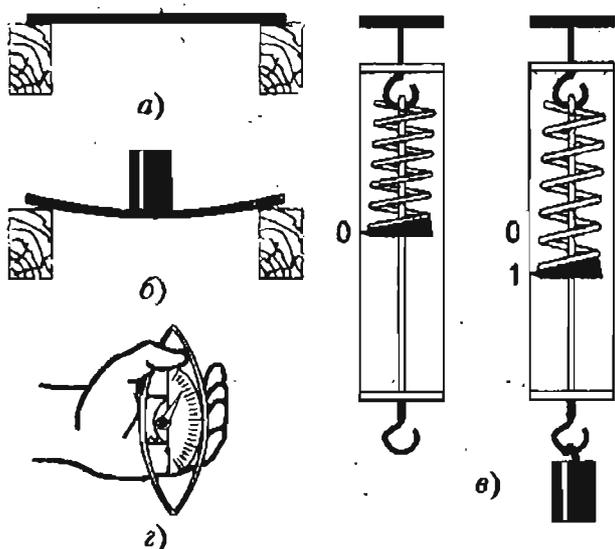


Рис. 145

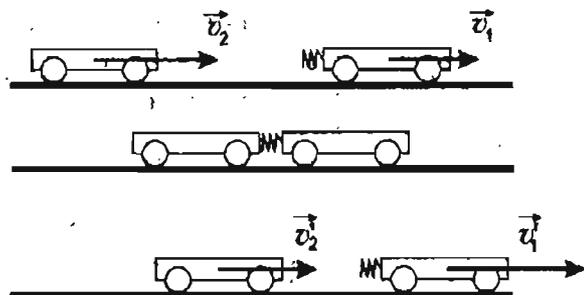


Рис. 146

При исследовании причин движения тел нас чаще всего интересует одно из взаимодействующих тел — то, движение которого рассматривается. Для удобства таких исследований вводится физическая величина; которая называется *силой*.

**Сила** — характеристика действия других тел на данное, в результате которого исследуемое тело либо деформируется, либо получает ускорение, либо испытывает и то, и другое.

Сила — векторная физическая величина. Она обозначается заглавными буквами латинского алфавита со стрелкой над ними:  $\vec{F}$ ,  $\vec{P}$ ,  $\vec{Q}$ ,  $\vec{N}$ .

Модуль силы обозначается теми же буквами, что и сила, но без стрелки над ними:  $F$ ,  $P$ ,  $Q$ ,  $N$ .

Часто используется представление о **проекции силы** на ту или иную ось системы координат, которая входит в данную систему отсчета (рис. 147).

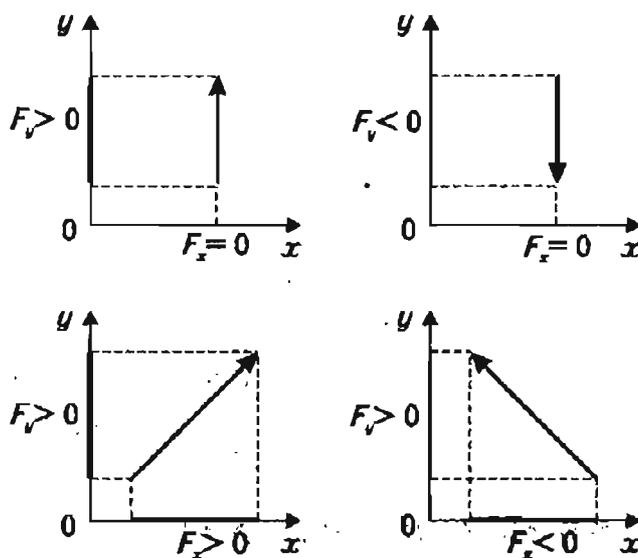


Рис. 147

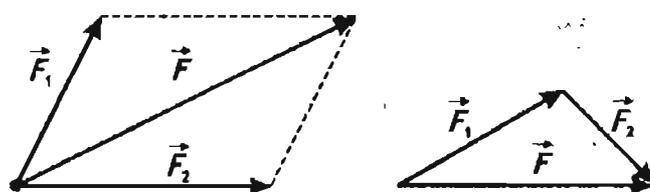


Рис. 148

Сила — вектор, поэтому сумму сил находят на основе геометрического сложения (рис. 148). Представленные на этом рисунке правила называются правилами параллелограмма (или треугольника).

**Масса тела** — физическая величина, характеризующая три фундаментальные свойства тел.

Масса характеризует инертность тел при поступательном движении. Опыт (рис. 149) показывает, что

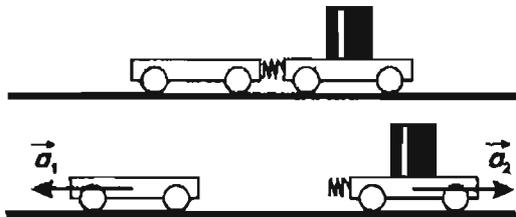


Рис. 149

при любом взаимодействии отношение модулей ускорений двух тел не зависит от взаимодействия и определяется только свойством тел, называемым **инертностью**, а количественная характеристика этого свойства называется **массой**:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1} \quad (1).$$

Масса характеризует **интенсивность гравитационного взаимодействия** тел: любые два тела, массы которых определены на основе соотношения (1), притягиваются друг к другу с силой, пропорциональной произведению масс:

$$F \sim m_1 \cdot m_2.$$

Масса тела определяет полный запас  $E_0$  **внутренней энергии** тела, обусловленной движением и взаимодействием частиц, из которых состоит тело:

$$E_0 = m \cdot c^2;$$

где  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  — скорость света в вакууме.

Масса — величина скалярная, обладает аддитивностью: масса любого тела равна сумме масс его частей. Единица измерения массы — 1 кг.

### Первый закон Ньютона

Каждый из трех законов динамики, входящих в ядро механики как физической теории, играет оп-

ределенную роль при их совместном рассмотрении. Именно выяснение роли и места этих законов привело к тому, что за более чем 300 лет со времени их открытия, формулировки законов несколько стали отличаться от тех, которые привел И. Ньютон в своих «Началах».

**Первый закон Ньютона** сейчас чаще всего формулируется следующим образом: *существуют такие системы отсчета, относительно которых поступательно движущееся тело сохраняет свою скорость постоянной, если на него не действуют другие тела (или действия других тел компенсируются).*

Таковыми системами отсчета часто можно считать систему отсчета, связанную с Землей или Солнцем.

Само явление сохранения скорости тела постоянной (в частности, равной нулю) называют **инерцией**. Поэтому и системы отсчета, относительно которых тела движутся с постоянной скоростью при компенсации внешних воздействий на них, называются **инерциальными**, а первый закон Ньютона называют **законом инерции**. Системы отсчета, которые движутся относительно инерциальной прямолинейно и равномерно, являются также инерциальными, поэтому ясно, что инерциальных систем отсчета неисчислимо много.

Первый закон Ньютона дает нам ответ на вопрос: почему, при каких условиях тело движется с постоянной скоростью? Ответ на него такой. Тело движется прямолинейно и равномерно, потому что действия на него других тел скомпенсированы. И пока такая компенсация есть, скорость тела остается неизменной, тело движется без ускорения (в состоянии покоя тело тоже не имеет ускорения).

Кроме инерциальных, есть и такие системы отсчета, которые инерциальными считать нельзя. Это системы отсчета, которые движутся относительно инерциальной системы с ускорением. Например, система отсчета, связанная с хоккеистом, который скользит по льду с ускорением относительно Земли, не может считаться инерциальной. Ведь относительно такого хоккеиста шайба, спокойно лежащая на льду, движется с ускорением, и первый закон Ньютона не выполняется. Такие системы отсчета, движущиеся относительно инерциальной системы с ускорением, так и называются: **неинерциальные системы отсчета**.

*Практикум по  
решению задач*

### Примеры решения задач

#### Пример 1

В чем смысл первого закона Ньютона?

Ответ

Первый закон Ньютона постулирует существование инерциальных систем отсчета, в которых свободное тело (тело, на которое не действуют другие тела) сохраняет состояние покоя или равномерно прямолинейного движения.

Понятие об инерциальной системе отсчета — идеализация. В реальности существуют системы отсчета, которые можно лишь приближенно считать инерциальными в условиях данной задачи. Так, к примеру, Землю с большой степенью точности можно считать инерциальной системой отсчета при расчете движения тел в классной комнате.

#### Пример 2

Яблоко, лежащее на столике равномерно движущегося поезда, скатывается при резком торможении поезда. Укажите системы отсчета, в которых:

- выполняется первый закон Ньютона;
- нарушается этот закон.

Ответ

В системе отсчета, связанной с поверхностью Земли, на яблоко в направлении его скатывания не действуют другие тела, и поэтому оно остается на месте. При торможении поезд как бы «вытаскивает» столик из-под яблока, и оно падает вертикально вниз. Первый закон Ньютона выполняется.

В системе отсчета, связанной с вагоном, на яблоко в направлении его скатывания также не действуют другие тела, однако оно движется ускоренно. Следовательно, первый закон Ньютона в этой системе отсчета не выполняется.

#### Пример 3

Вследствие взаимодействия Луны и Земли их центры обращаются вокруг общей точки  $P$ , отстоящей от центра Земли на 4700 км. Расстояние от Земли до Луны 384 000 км. На основе этих данных вычислите, во сколько раз масса Земли больше массы Луны.

Решение

В соответствии с определением массы запишем:

$$\frac{M_3}{M_л} = \frac{|\vec{a}_л|}{|\vec{a}_3|} = \frac{\omega^2 R_л}{\omega^2 R_3} = \frac{R_л}{R_3},$$

где  $R_л$  и  $R_3$  — радиусы орбит Луны и Земли.

Из условий задачи ясно, что:

$$R_3 = 4700 \text{ км, а } R_л = (384000 - 4700) = 379\,300 \text{ км.}$$

Следовательно:

$$\frac{M_3}{M_л} = \frac{379300}{4700} \approx 81.$$

#### Пример 4

На тело действуют три равных по модулю силы, направленные под углом  $120^\circ$  друг относительно друга. Чему равна равнодействующая этих сил?

Решение

Из рис. 150 видно, что модуль равнодействующей сил  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$  равен  $|\vec{R}| = |\vec{F}_3|$ , так как треугольники  $\Delta OF_1R$  и  $\Delta OF_2R$  равносторонние. Векторная сумма  $\vec{R}$  и  $\vec{F}_3$  равна нулю. Следовательно:  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = 0$ .

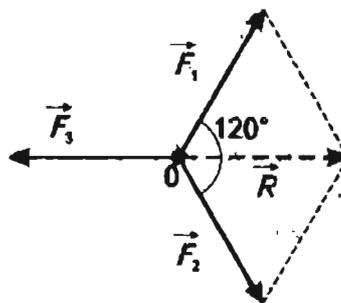


Рис. 150

### Решить самостоятельно

- Вперед или назад отклонится человек, стоящий в лодке, если она внезапно останавливается?
- Можно ли считать инерциальной систему отсчета, связанную с...
  - равномерно движущимся автомобилем?
  - лыжником, ускоренно скользящим с горы?
  - трамваем, совершающим поворот?
- Два тела разной массы ( $m_1 = 1 \text{ кг}$ ;  $m_2 = 2 \text{ кг}$ ) сталкиваются друг с другом. У какого тела модуль ускорения будет больше? Во сколько раз?

4. Из опытов установлено, что отношение модулей ускорений двух взаимодействующих тел остается постоянным. От чего зависит значение этого отношения?
5. На что требуется больше времени: остановку тяжелого грузовика или легкового автомобиля, двигающихся с одинаковой скоростью, если на них действует одинаковая тормозящая сила?
6. Чему равна равнодействующая двух сил, образующих между собой угол  $90^\circ$ , если модули этих сил равны 30 Н и 40 Н?
7. На столе лежит брусок. Какие силы действуют на него? Изобразите их графически. Чему равна равнодействующая этих сил?
8. Шарик висит на нити. Какие силы действуют на него? Изобразите их графически. Чему равна равнодействующая этих сил?
9. Парашютист спускается, двигаясь равномерно и прямолинейно (рис. 151). На парашютиста — сила сопротивления воздуха, на парашютиста — сила тяжести. Чему равна равнодействующая этих сил?

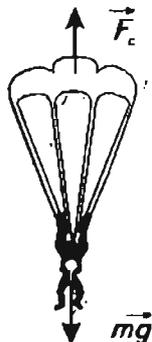


Рис. 151

*Контрольные  
работы*

**Вариант 1**

1. Какая из величин: масса или сила, — векторная?
  - А. Только первая.
  - Б. Только вторая.
  - В. Первая и вторая.
  - Г. Ни первая, ни вторая.

2. Равнодействующая всех сил, действующих на тело, равна нулю. Двигается это тело или находится в состоянии покоя?
  - А. Тело обязательно находится в состоянии покоя.
  - Б. Тело движется равномерно прямолинейно или находится в состоянии покоя.
  - В. Тело обязательно движется равномерно прямолинейно.
  - Г. Тело движется равноускоренно.
3. На рис. 152, а, представлены направления векторов скорости  $\vec{v}$  и ускорения  $\vec{a}$  мяча. Какое из представленных на рис. 152, б направлений имеет вектор равнодействующей  $\vec{F}$  всех сил, приложенных к мячу?

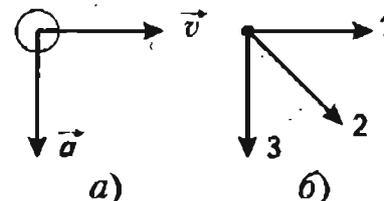


Рис. 152

- А. 1.
  - Б. 2.
  - В. 3.
  - Г.  $F = 0$ .
4. На рис. 153 представлен график зависимости модуля равнодействующей силы  $F$ , действующей на тело, от времени. Чему равно изменение скорости тела массой 2 кг за 3 с?

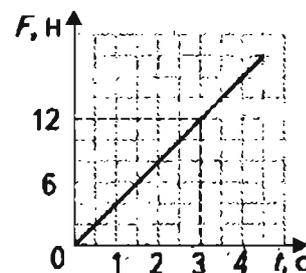


Рис. 153

- А.  $9 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .
- Б.  $12 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .
- В.  $18 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .
- Г.  $36 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

5. На экспериментальной установке, изображенной на рис. 154, установлены два шара массами  $m_x$  и  $m_y$  ( $m_y = 0,1$  кг), скрепленные сжатой легкой пружиной. Чему равна масса  $m_x$ , если после пережигания нити  $l_1 = 1$  м;  $l_2 = 0,5$  м?

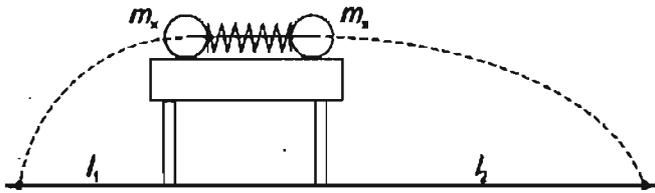


Рис. 154

- А. 0,025 кг.       Б. 0,05 кг.  
 В. 0,2 кг.       Г. 0,4 кг.
6. Две силы  $F_1 = 30$  Н и  $F_2 = 40$  Н приложены к одной точке тела. Угол между векторами  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$  равен  $90^\circ$ . Чему равен модуль равнодействующей этих сил?
- А. 10 Н.       Б. 50 Н.  
 В. 70 Н.       Г. 35 Н.
7. Тело движется прямолинейно с постоянной скоростью. Какое утверждение о равнодействующей всех приложенных к нему сил правильно?

- А. Не равна нулю, постоянна по модулю и направлению.  
 Б. Не равна нулю, постоянна по направлению, но не по модулю.  
 В. Не равна нулю, постоянна по модулю, но не по направлению.  
 Г. Равна нулю.  
 Д. Равна нулю или постоянна по модулю и направлению.

**Вариант 2**

1. Какая из величин: масса или сила, — скалярная?
- А. Только первая.  
 Б. Только вторая.  
 В. Первая и вторая.  
 Г. Ни первая ни вторая.
2. Векторная сумма всех сил, действующая на движущийся мяч относительно инерциальной сис-

темы отсчета, равна нулю. Какова траектория движения мяча?

- А. Точка.  
 Б. Прямая.  
 В. Парабола.  
 Г. Траектория может быть любой.

3. На рис. 155, а, представлены направления векторов скорости  $\vec{v}$  и  $\vec{F}$  — равнодействующей всех сил, приложенных к мячу. Какое из представленных на рис. 155, б направлений имеет вектор ускорения  $\vec{a}$ ?

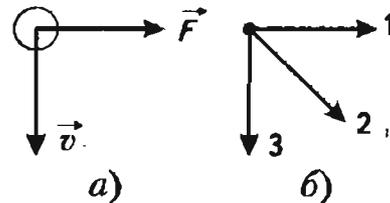


Рис. 155

- А. 1.       Б. 2.  
 В. 3.       Г.  $a = 0$ .
4. На рис. 156 представлен график зависимости модуля равнодействующей силы  $F$ , действующей на прямолинейно движущееся тело, от времени. Чему равно изменение скорости тела массой 2 кг за 4 с?

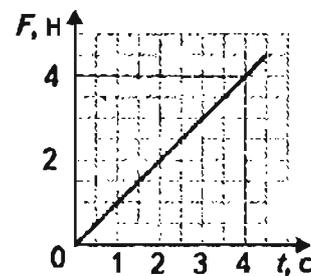


Рис. 156

- А.  $4 \frac{m}{c}$ .       Б.  $8 \frac{m}{c}$ .  
 В.  $16 \frac{m}{c}$ .       Г.  $32 \frac{m}{c}$ .
5. Каким опытом внутри закрытой каюты корабля можно установить, движется ли он равномерно и прямолинейно или покоится?
- А. Дважды бросить мяч с одинаковой начальной скоростью в направлении от носа к

корме, затем от кормы к носу и с помощью точных приборов измерить время движения  $t_1$  и  $t_2$  в этих двух опытах. В покое  $t_1 = t_2$ , в движении  $t_1 < t_2$ .

Б. Укрепить сосуд с небольшим отверстием у потолка каюты и отметить с помощью отвеса точку на полу точно под отвесом. Затем налить воду в сосуд и проследить, куда будут падать капли. В покое они должны падать отвесно, при движении несколько отставать.

В. В большой каюте можно измерить длину своего прыжка от носа к корме, потом от кормы к носу. В покоящемся корабле длина прыжков будет одинаковой, в движущемся — будет меньше при прыжке в направлении движения корабля.

Г. Можно установить движение или покой любым из опытов А–В.

Д. Никакими механическими опытами внутри системы нельзя установить, движется ли она равномерно и прямолинейно или находится в покое.

6. Две силы  $F_1 = 2$  Н и  $F_2 = 3$  Н приложены к одной точке тела. Угол между векторами  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$  равен  $90^\circ$ . Чему равен модуль равнодействующей этих сил?

- А. 1 Н.  Б.  $\sqrt{13}$  Н.  
 В. 5 Н.  Г. 13 Н.

7. Тело движется прямолинейно с постоянной скоростью. Какое утверждение о равнодействующей всех приложенных к нему сил правильно?

- А. Не равна нулю, постоянна по модулю, но не по направлению.  
 Б. Не равна нулю, постоянна по направлению, но не по модулю.  
 В. Не равна нулю, постоянна по модулю и направлению.  
 Г. Равна нулю или постоянна по модулю и направлению.  
 Д. Равна нулю.

### 3. ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

**Второй закон Ньютона** позволяет определить ускорение, с которым движется материальная точка относительно инерциальной системы отсчета при известных силах:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots}{m} = \frac{\sum \vec{F}}{m}$$

Эту же формулу можно применить для нахождения ускорения поступательно движущегося тела или ускорения центра масс при произвольном движении тела (рис. 157). Обратим внимание: ско-

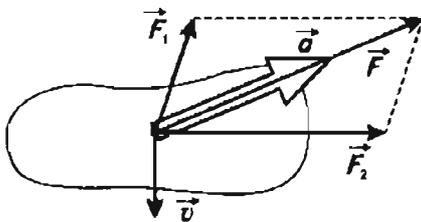


Рис. 157

рость движения тела может быть направлена совершенно произвольно.

Второй закон Ньютона выражает основную идею механики: *сила — причина изменения скорости тела.*

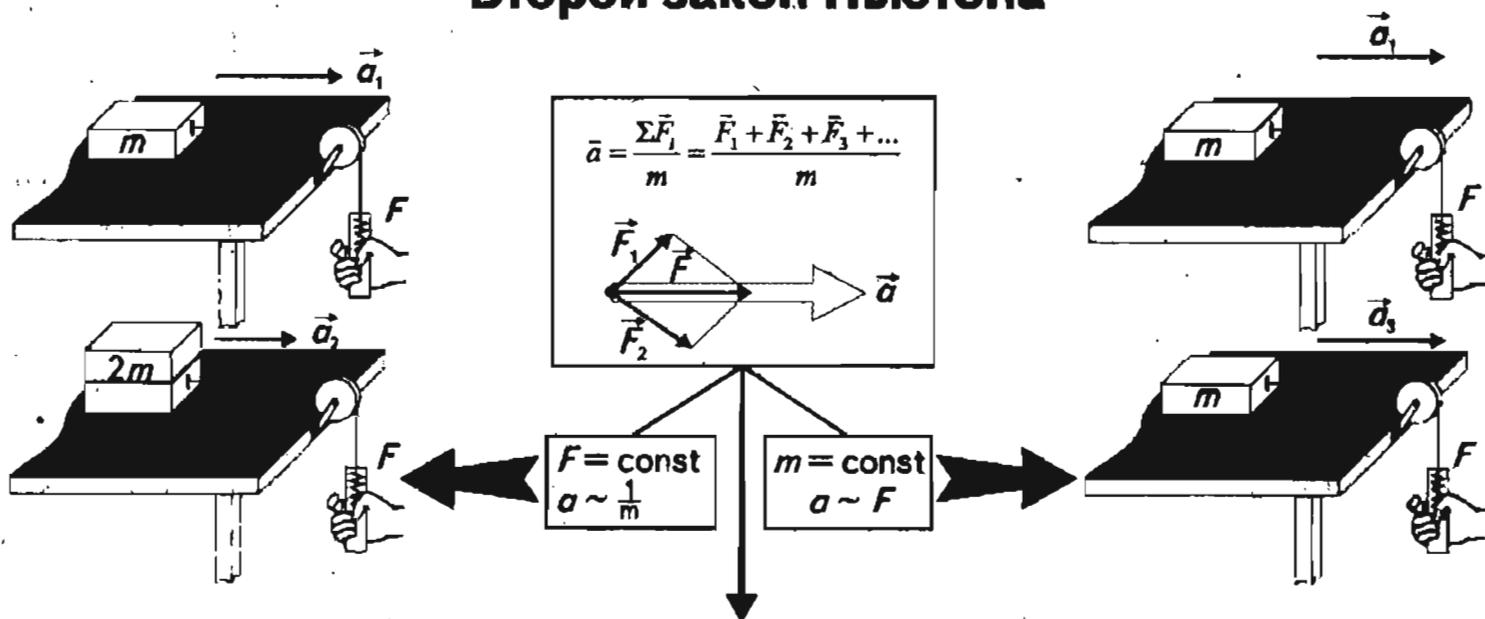
Второй закон дает динамический способ измерения силы: достаточно измерить ускорение движения тела, и тогда сила определяется соотношением:  $\vec{F} = m\vec{a}$ .

Часто именно выражение  $\vec{F} = m\vec{a}$  считается **законом Ньютона**: *сила, действующая на тело, равна произведению массы тела на сообщаемое этой силой ускорение.*

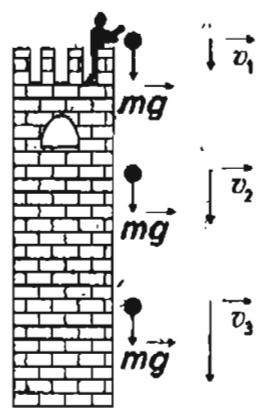
Справедливость фундаментальных законов, к которым относятся и законы Ньютона, проверяется не единичными опытами, а возможностью с использованием данного закона объяснить систему явлений природы и техники, разнообразных следствий. Рассмотрим некоторые примеры.

СХЕМА 9

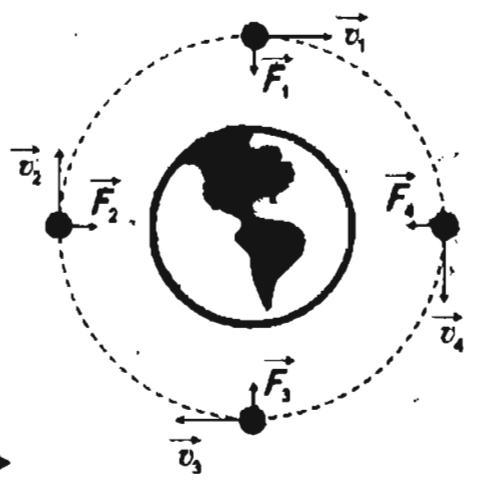
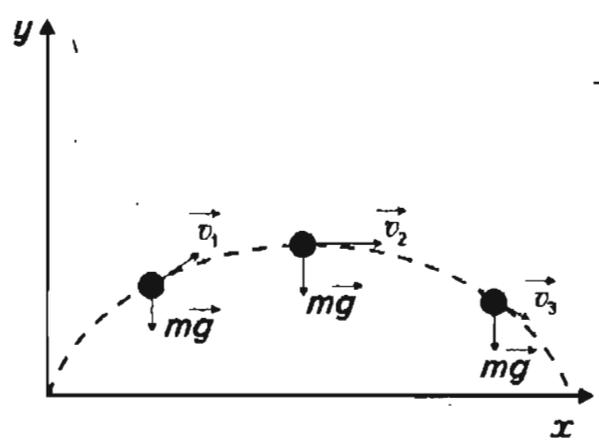
Второй закон Ньютона



Сила — причина изменения скорости



$v_1 < v_2 < v_3$   
 $\vec{a} = \vec{g} = \text{const}$



$v_1 = v_2 = v_3 = v_4$   
 $F_1 = F_2 = F_3 = F_4$

Первый пример

Раньше упоминалось, что масса — мера инертности. Второй закон Ньютона позволяет получить более ясное и четкое представление об этом свойстве.

Пусть одинаковая сила  $F$  действует на разные по массе тела (верхняя левая часть схемы 9). Тогда ускорения этих тел обратно пропорциональны их массам.

Ускорение первого тела:  $a_1 = \frac{F}{m_1}$ ; второе

тело имеет ускорение  $a_2 = \frac{F}{m_2}$ . Отношение ускорений обратно пропорционально отношению масс:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{\frac{F}{m_1}}{\frac{F}{m_2}} \rightarrow \frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}$$

Пусть эти тела надо разогнать до одинаковой скорости  $v$ . Сколько времени сила  $F$  должна действовать на первое тело?

Так как  $v = at$  и  $a_1 = \frac{F}{m_1}$ , то  $v = \frac{F}{m_1} t_1$ .

Время разгона первого тела равно  $t_1 = \frac{m_1 v}{F}$ .

Время разгона второго тела равно:  $t_2 = \frac{m_2 v}{F}$ .

Таким образом, время разгона двух тел до одинаковой скорости под действием одной и той же силы пропорционально их массе.

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{\frac{m_1 v}{F}}{\frac{m_2 v}{F}} = \frac{m_1}{m_2} \text{ (рис. 158).}$$

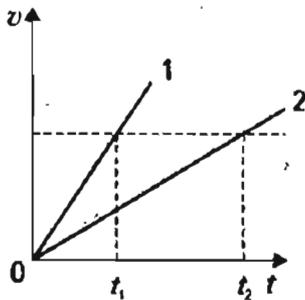


Рис. 158

Именно это свойство тел имеют в виду, когда говорят, что масса — мера инертности тела при его поступательном движении. Тело большей массы разгоняется медленнее, оно инертнее (лат. *inertia* — неподвижность, бездеятельность).

Второй пример

Второй закон Ньютона позволяет сравнить движения двух одинаковых тел под действием разных сил. Пусть, например, на два покоящихся тела действуют силы, модули которых отличаются в  $n$  раз:

$\frac{F_2}{F_1} = n$ . Сравним промежутки времени  $t_2$  и  $t_1$ , за которые эти тела совершат одинаковые перемещения.

Так как путь равен  $l = \frac{at^2}{2}$ , то  $t_1 = \sqrt{\frac{2l}{a_1}}$ , а  $t_2 = \sqrt{\frac{2l}{a_2}}$ .

$$\text{Отсюда: } \frac{t_1}{t_2} = \frac{\sqrt{\frac{2l}{a_1}}}{\sqrt{\frac{2l}{a_2}}} = \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} = \sqrt{\frac{F_2}{F_1}} = \sqrt{n}$$

Модели опытной проверки следствий из примеров представлены в верхней части схемы 9.

Вы их сможете проделать, выполнив творческое задание.

Третий пример

Процесс движения транспортных средств обычно состоит из трех этапов: разгон, равномерное движение, торможение. Это видно на графике скорости, который представлен на рис. 159.

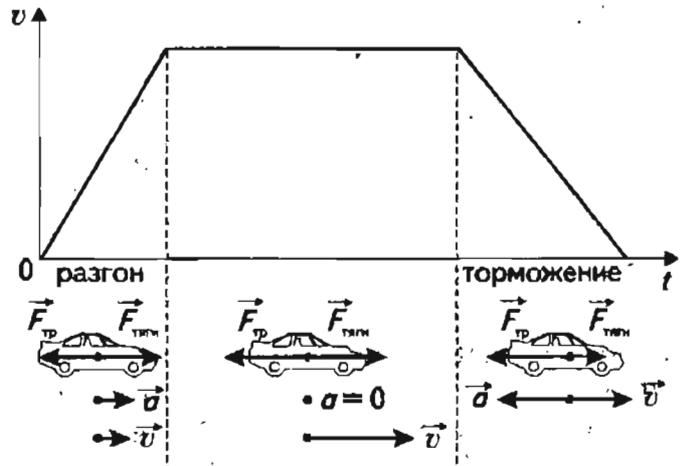


Рис. 159

Без воздействия силы тело, покоящееся относительно Земли, не придет в состояние движения. Второй закон Ньютона объясняет и процесс начала движения, и процесс торможения. Если тело вначале покоилось, а через некоторый промежуток времени начало двигаться, то в течение этого промежутка времени оно движется с ускорением:  $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{0}}{t}$ . Для

этого на тело должна действовать сила  $\vec{F}_{\text{равн}} = m\vec{a}$ . В результате действия силы покоящееся тело приобрело скорость:  $\vec{v} = \vec{a}t$ .

Далее, если равнодействующая сила станет равна нулю, тело будет двигаться равномерно, без ускорения: если  $\vec{a} = 0$ , то  $\vec{F}_{\text{равн}} = m\vec{a} = 0$ . И только чтобы остановить тело, вновь понадобится сила, но теперь она должна быть направлена в сторону, противоположную скорости. Ведь направление силы совпадает с направлением ускорения, а при уменьшении скорости ускорение направлено в сторону, противоположную скорости. Итак, опираясь на закон:  $\vec{a} = \frac{\vec{F}_{\text{равн}}}{m}$ , — можно объяснить разгон, равномерное движение и торможение тел.

**Четвертый пример**

Второй закон Ньютона позволяет объяснить сколь угодно сложное движение относительно инерциальных систем отсчета. С его использованием полностью объясняется криволинейное движение.

Пусть тело имеет скорость  $\vec{v}_0$ , и на него действует сила  $\vec{F}$  (рис. 160). Тогда ускорение  $\vec{a}$  будет сонап-

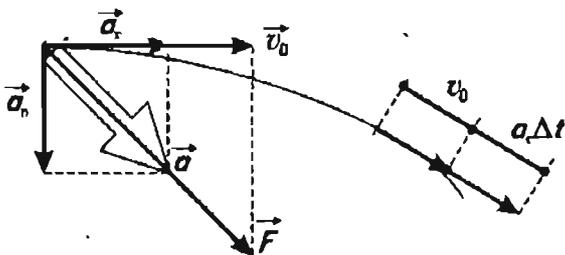


Рис. 160

равлено с силой. Через промежуток времени  $\Delta t$  изменится и модуль, и направление  $\vec{v}_0$ . Изменение модуля будет равно  $a\Delta t$ , а изменение направления определится вектором  $\vec{a}\Delta t$ . В частности, легко

объяснить равномерное движение по окружности под действием сил тяжести и упругости.

Рассмотрим, при каких условиях тело будет двигаться под действием сил тяжести и упругости равномерно по окружности радиуса  $R$  (рис. 161).

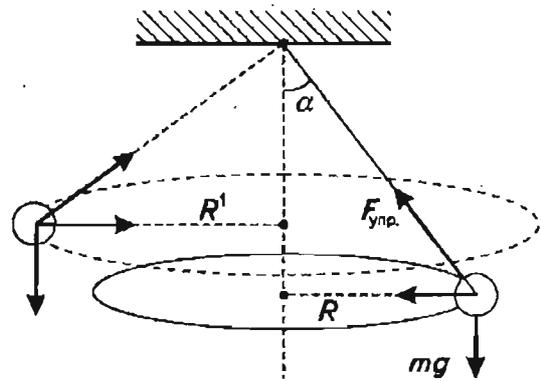


Рис. 161

Второй закон Ньютона дает ответ на этот вопрос. Это происходит при условии, если скорость  $v$  будет такова, что  $m\vec{a}_{\text{ис}}$  равно  $\vec{F}_{\text{тяж}} + \vec{F}_{\text{упр}}$ , где  $|\vec{a}_{\text{ис}}| = \frac{v^2}{R}$ . При увеличении скорости  $v$  (например, за счет действия руки, раскручивающей нить) должны увеличиться: угол  $\alpha$ , сумма  $\vec{F}_{\text{тяж}} + \vec{F}_{\text{упр}}$  и радиус. И это увеличение должно быть таким, чтобы:

$$m \frac{(v^1)^2}{R^1} = F,$$

где  $F$  — модуль суммы  $\vec{F}_{\text{тяж}} + \vec{F}_{\text{упр}}$ .

*Экспериментальные исследования*

**Экспериментальное задание: динамическое измерение силы**

- а) Используя электромагнитный прибор для изучения движения тел, определите равнодействующую сил тяжести, упругости и трения, которые действуют на тело при скольжении бруска по наклонной плоскости.
- б) Соберите установку, с использованием которой исследовалось движение тела по окружности. Определите направление и модуль равнодействующей сил тяжести и упругости, которые действуют на тело.

*П р и ж м и с ы п о  
р е ш е н и ю з а д а ч*

### Примеры решения задач

#### Пример 1

Мяч массой 0,5 кг после удара, длящегося 0,01 с, приобретает скорость  $15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Чему равна средняя сила удара?

Решение

Средняя сила удара  $F_{\text{ср}}$  равна:

$$F_{\text{ср}} = ma_{\text{ср}} = m \frac{\Delta v}{\Delta t} = 0,5 \frac{15}{0,01} = 750 \text{ Н.}$$

#### Пример 2

Тело массой 2 кг двигалось в соответствии с графиком  $v_x(t)$  (рис. 162, а). Постройте график зависимости силы, действующей на тело, от времени.

Решение

В интервале времени  $[0-1]$  с ускорение равно нулю ( $a_{x1} = 0$ ); в интервале времени  $[1-2]$  с  $\rightarrow a_{x2} = -5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ;

в интервале времени  $[2-4]$  с  $\rightarrow a_{x3} = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . Следовательно, силы, действующие на этих участках, равны:  $F_x = ma_x$ ;  $F_{1x} = 0$ ;  $F_{2x} = -10 \text{ Н}$ ;  $F_{3x} = 10 \text{ Н}$ . Искомый график представлен на рис. 162, б.

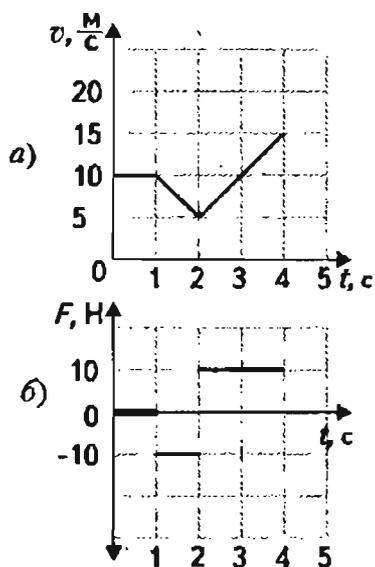


Рис. 162

#### Пример 3

Лыжник массой 80 кг в конце спуска с горы приобрел скорость  $12 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  и продолжал двигаться по горизонтальной поверхности. Через какое время лыжник остановился под действием силы трения, равной 16 Н? Какой путь по горизонтальной поверхности он при этом прошел?

Решение

Проекция ускорения лыжника на горизонтальную ось  $Ox$  равна:

$$a_x = \frac{F_x}{m} = -\frac{16 \text{ Н}}{80 \text{ кг}} = -0,2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Время движения лыжника можно найти из выражения:  $v_x = a_x \cdot t$ .

$$t = \frac{v_x}{a_x} = \frac{-12 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{-0,2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = 60 \text{ с.}$$

Пройденный путь равен:

$$s_x = v_x t + \frac{a_x t^2}{2} = 12 \cdot 60 - \frac{0,2 \cdot 60^2}{2} = 720 - 360 = 360 \text{ м.}$$

Этот же результат можно получить, применив формулу:  $-v_x^2 = 2a_x s$ , так как конечная скорость лыжника равна нулю:

$$s_x = -\frac{v_x^2}{2a_x}; \quad s_x = -\frac{12^2}{2 \cdot (-0,2)} = 360 \text{ м.}$$

#### Пример 4

Груз массой  $m = 50 \text{ кг}$  с помощью каната поднимают вверх на высоту  $H = 10 \text{ м}$  в течение времени  $t = 2 \text{ с}$ . Считая движение груза равноускоренным, рассчитайте силу упругости во время подъема.

Решение

На груз действуют сила тяжести  $\vec{F}_{\text{тяж}}$  и сила упругости  $\vec{F}_y$  каната (рис. 163). Применяв второй закон Ньютона, получим:  $\vec{F}_{\text{равн}} = m\vec{a}$ .

$$F_y - mg = ma \rightarrow F_y = m(g + a).$$

Ускорение рассчитаем, применив формулу из кинематики:  $a = \frac{2H}{t^2}$ . Отсюда:

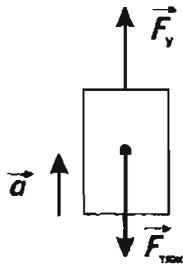


Рис. 163

$$F_y = m \left( g + \frac{2H}{t^2} \right) \rightarrow F_y \approx 50 \left( 10 + \frac{20}{2^2} \right) \approx 750 \text{ Н.}$$

Пример 5

Автомобиль массой 2 т проходит по выпуклому мосту, имеющему радиус кривизны 40 м, со скоростью  $36 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ . С какой силой автомобиль давит на мост в его наивысшей точке?

Решение

Укажем силы, действующие на автомобиль (рис. 164): силу тяжести  $mg$  и силу опоры  $\vec{N}$ . Равнодейству-

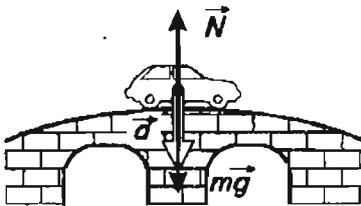


Рис. 164

ющая сила создает центростремительное ускорение  $a_{\text{цс}}$ . В соответствии со вторым законом Ньютона:

$$mg - N = ma_{\text{цс}}$$

Центростремительное ускорение равно:

$$a_{\text{цс}} = \frac{v^2}{R}$$

Следовательно:

$$N = m \left( g - a_{\text{цс}} \right) = m \left( g - \frac{v^2}{R} \right)$$

$$N = 2000 \left( 10 - \frac{10^2}{40} \right) = 15000 \text{ (Н).}$$

**Решить самостоятельно**

Согласны ли вы с утверждением, что тело движется в том направлении, куда направлена действующая на него сила?

2. На тело действует сила  $\vec{F}$  (рис. 165). Можно ли указать, в каком направлении оно движется?

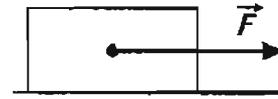


Рис. 165

3. С каким ускорением двигался при разбеге реактивный самолет массой 80 т, если сила тяги двигателя 120 кН?

4. Сила 50 Н сообщает телу ускорение  $0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . Какая сила сообщит этому телу ускорение  $1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ?

5. На рис. 166 дан график зависимости скорости тела массой 2 кг от времени. Постройте график зависимости силы, действующей на тело, от времени.

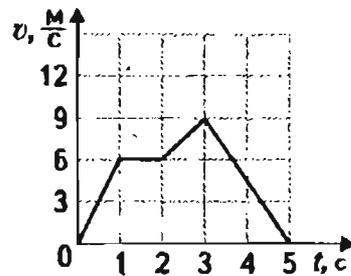


Рис. 166

6. По графику изменения силы, действующей на тело массой 0,5 кг (рис. 167), постройте график зависимости скорости и координаты от времени. Начальные условия:  $v_{0x} = 0 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ,  $x_0 = 0 \text{ м}$ .

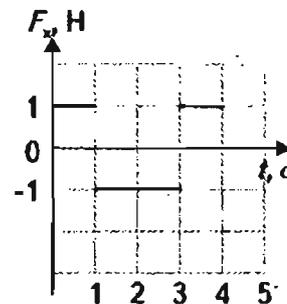


Рис. 167

7. Тело массой 400 г, двигаясь с некоторой начальной скоростью, за 5 с под действием силы 0,6 Н

приобрело скорость  $10 \frac{m}{c}$ . Чему была равна начальная скорость?

8. На гладком горизонтальном столе находятся два бруска, массой 2 кг и 3 кг, связанных нитью. К первому бруску приложена сила 5 Н, которая тянет его в горизонтальном направлении. Чему равно ускорение брусков? Чему равна сила упругости нити, связывающей бруски? Изменится ли она, если сила будет приложена ко второму бруску?

*Контрольные  
работы*

### Вариант 1

1. Тело движется равноускоренно и прямолинейно. Какое утверждение о равнодействующей всех приложенных к нему сил правильно?
- А. Не равна нулю, постоянна по модулю и направлению.
- Б. Не равна нулю, постоянна по направлению, но не по модулю.
- В. Не равна нулю, постоянна по модулю, но не по направлению.
- Г. Равна нулю.
- Д. Равна нулю или постоянна по модулю и направлению.
2. Равнодействующая всех сил, приложенных к телу массой 5 кг, равна 10 Н. Каковы скорость и ускорение движения тела?
- А. Скорость  $0 \frac{m}{c}$ , ускорение  $2 \frac{m}{c^2}$ .
- Б. Скорость  $2 \frac{m}{c}$ , ускорение  $0 \frac{m}{c^2}$ .
- В. Скорость  $2 \frac{m}{c}$ , ускорение  $2 \frac{m}{c^2}$ .
- Г. Скорость может быть любой, ускорение  $2 \frac{m}{c^2}$ .
- Д. Скорость  $2 \frac{m}{c}$ , ускорение может быть любым.
- Е. Скорость и ускорение могут быть любыми.

3. Под действием силы 10 Н тело движется с ускорением  $5 \frac{m}{c^2}$ . Какова масса тела?

- А. 2 кг.  Б. 0,5 кг.
- В. 50 кг.  Г. Масса может быть любой.

4. Молекула газа движется со скоростью  $\vec{v}$ . Равнодействующая всех действующих на нее сил  $\vec{F}$  (рис. 168, а). Какой вектор на рис. 168, б совпадает по направлению с вектором ускорения молекулы?

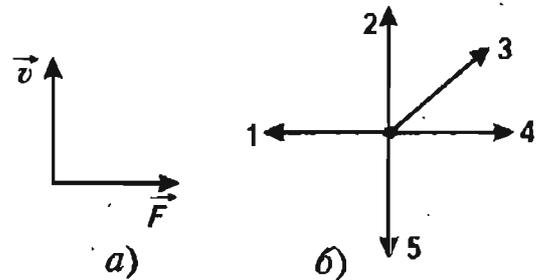


Рис. 168

- А. 1.  Б. 2.
- В. 3.  Г. 4.
- Д. 5.

5. Человек массой 50 кг решил исследовать зависимость своего веса от ускорения. Какими были показания пружинных весов при движении лифта с ускорением  $1 \frac{m}{c^2}$ , направленным вверх? ( $g \approx 10 \frac{m}{c^2}$ ).

- А. 50 Н.  Б. 500 Н.
- В. 450 Н.  Г. 550 Н.

### Вариант 2

1. Тело движется равномерно по окружности. Какое утверждение о равнодействующей всех приложенных к нему сил правильно?
- А. Не равна нулю, постоянна по модулю, но не по направлению.
- Б. Не равна нулю, постоянна по направлению, но не по модулю.
- В. Не равна нулю, постоянна по модулю и направлению.

Г. Равна нулю или постоянна по модулю и направлению.

Д. Равна нулю.

2. Равнодействующая всех сил, приложенных к телу массой 3 кг, равна 6 Н. Каковы скорость и ускорение движения тела?

А. Скорость  $0 \frac{м}{с}$ , ускорение  $2 \frac{м}{с^2}$ .

Б. Скорость  $2 \frac{м}{с}$ , ускорение  $0 \frac{м}{с^2}$ .

В. Скорость  $2 \frac{м}{с}$ , ускорение  $2 \frac{м}{с^2}$ .

Г. Скорость может быть любой, ускорение  $2 \frac{м}{с^2}$ .

Д. Скорость  $2 \frac{м}{с}$ , ускорение может быть любым.

Е. Скорость и ускорение могут быть любыми.

3. Тело массой 2 кг движется с ускорением  $4 \frac{м}{с^2}$ .

Какова равнодействующая всех приложенных к телу сил?

А. 2 Н.

Б. 0,5 Н.

В. 8 Н.

Г. Равнодействующая может иметь любое значение.

4. Молекула газа движется со скоростью  $\vec{v}$  и ускорением  $\vec{a}$  (рис. 169, а). Какой вектор на рис. 169, б совпадает по направлению с вектором равнодействующей всех сил, действующих на молекулу?

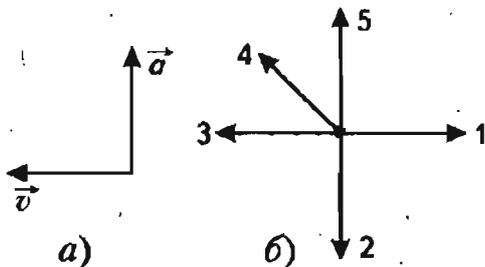


Рис. 169

А. 1.

Б. 2.

В. 3.

Г. 4.

Д. 5.

5. Человек массой 50 кг решил исследовать зависимость своего веса от ускорения. Какими были

показания пружинных весов при движении

лифта с ускорением  $1 \frac{м}{с^2}$ , направленным вниз?

( $g \approx 10 \frac{м}{с^2}$ ).

А. 50 Н.

Б. 500 Н.

В. 450 Н.

Г. 550 Н.

**Контрольная работа повышенного уровня сложности**

**Вариант 1**

1. Снаряд массой 2 кг вылетает из ствола орудия

горизонтально со скоростью  $1000 \frac{м}{с}$ . Определите

силу давления пороховых газов, считая ее постоянной, если длина ствола равна 3,5 м.

2. Скорость материальной точки изменяется по закону  $v_x = 10 + 0,5t$  под действием силы 6 Н. Какова масса точки?

3. На рис. 170 изображены графики скорости движения двух тел (I и II), имеющих одинаковую массу, и тела III массой 10 кг. Найдите проекцию силы, действующей на каждое тело.

4. Под действием силы 150 Н тело движется так, что его координата в направлении действия силы изменяется по закону  $x = 100 + 5t + 0,5t^2$ . Какова масса тела?

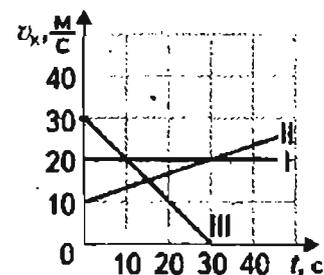


Рис. 170

## Вариант 2.

1. Скорость автомобиля изменяется по закону  $x = 10 + 0,5t$ . Найдите результирующую силу, действующую на него, если масса автомобиля равна 1,5 т.
2. Найдите проекцию силы  $F_x$ , действующей на тело массой 500 кг, если его координата изменяется по закону  $x = 20 - 10t + t^2$ .
3. На рис. 171 дан график зависимости проекции скорости тела массой 2 кг от времени. Найдите проекцию силы, действующей на тело на каждом этапе движения.

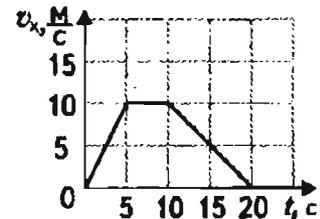


Рис. 171

4. Напишите уравнение скорости движения реактивного самолета, начинающего разбег по взлетной полосе аэродрома, если результирующая сила тяги двигателя равна 90 кН, а масса его равна 60 т.

#### 4. ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА. СИСТЕМА ЗАКОНОВ ДИНАМИКИ

Конспект.

Таблицы. Ссылки

В основном законе динамики:  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ , — речь идет о силе, действующей на данное тело, и о результате ее действия на тело массы  $m$ , т. е. об ускорении тела. Но сила  $\vec{F}$  возникла в результате взаимодействия данного тела с каким-то другим. Во втором законе Ньютона об этом другом теле ничего не говорится.

Рассмотрим пример. На доске стоит груз (схема 10). Доска действует на него с силой  $\vec{F}_{\text{уп}}$ .

Эта сила возникает в результате деформации доски и направлена вверх. Груз, в свою очередь, действует на доску с силой  $\vec{P}$ . Вопрос, на который необходимо ответить, касается сил взаимодействия тел. В данном случае это:  $\vec{F}_{\text{уп}}$  и  $\vec{P}$ .

В общем случае проблема ставится так. Пусть взаимодействуют два тела: А и В. Сила, с которой тело В действует на тело А, — это сила  $\vec{F}_1$ . Сила, с которой тело А действует на тело В, — это сила  $\vec{F}_2$ .

На поставленный вопрос отвечает третий закон Ньютона.

В «Началах» Ньютона третья аксиома сформулирована следующим образом: *действую всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе взаимодействия двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные стороны:  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$  (схема 10).*

В современных учебниках чаще всего приводится следующая формулировка третьего закона, которому, естественно, дано имя И. Ньютона: *тела действуют друг на друга с силами, направленными вдоль одной и той же прямой, равными по модулю и противоположными по направлению.*

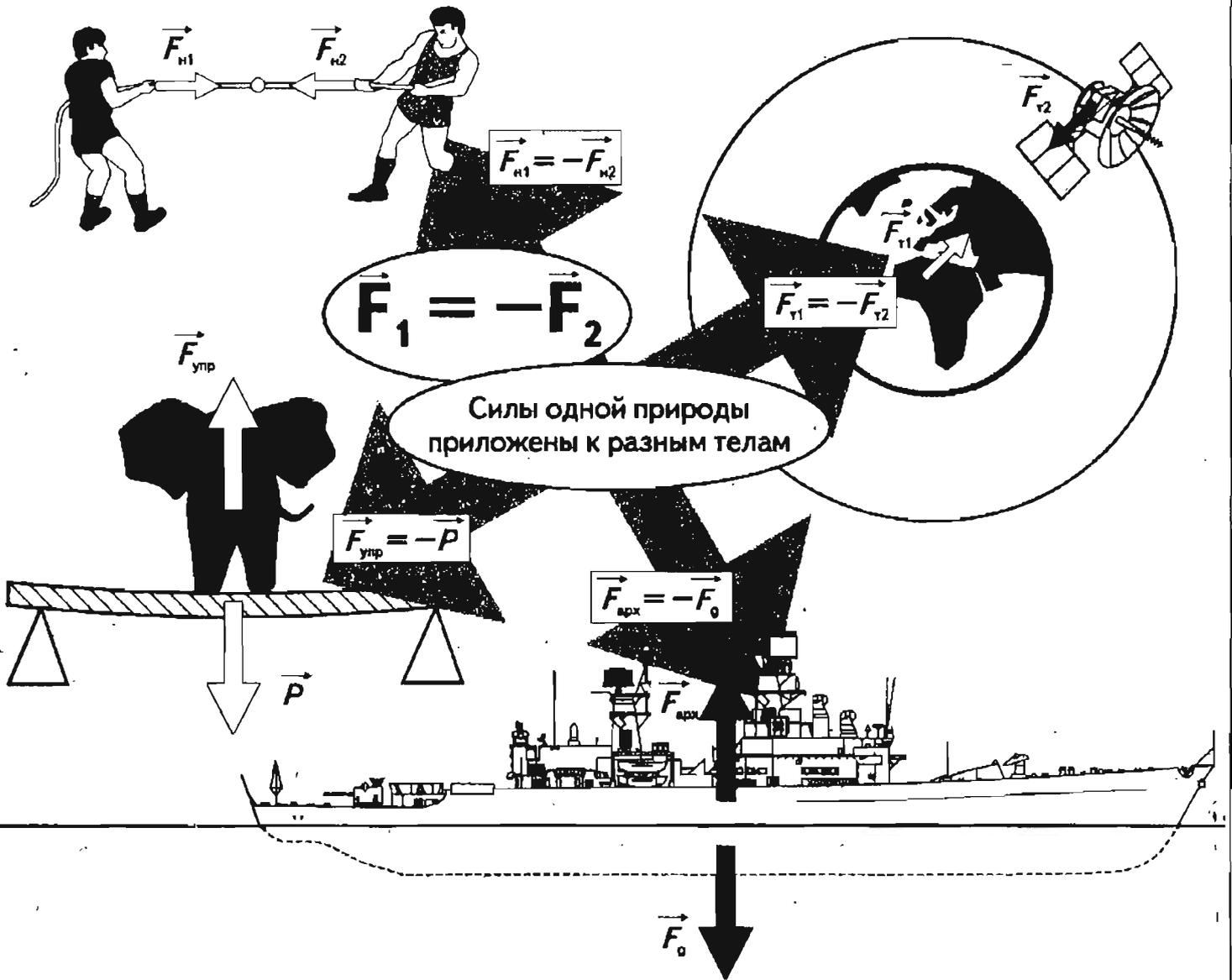
Обратите внимание: эти силы приложены к разным телам и имеют одну и ту же природу. Это хорошо видно на схеме 10.

Силы взаимодействия мальчиков — это силы упругости, приложенные к ним. То же относится к грузу, стоящему на подставке.

Силы взаимодействия Земли и спутника — это сила тяготения.

СХЕМА 10

Третий закон Ньютона



Сила взаимодействия заряженных тел — сила электрическая.

**Принцип относительности Г. Галилея**

Известно, что первый закон Ньютона верен, если рассматривать движение тела относительно инерциальной системы отсчета. Инерциальных систем отсчета имеется бесчисленное множество. И, ко-

нечно, первый закон Ньютона для любой из них один и тот же. А другие два закона?

Сила, приложенная к телу, не может измениться из-за того, что мы заменили одну инерциальную систему отсчета другой. Не может из-за этого измениться и масса тела. Точно так же от выбора инерциальной системы отсчета не может зависеть и ускорение тела. А так как кроме силы, массы и

ускорения никакие другие величины в законы Ньютона не входят, то можно утверждать, что *законы механического движения одинаковы для всех инерциальных систем отсчета*) Это утверждение называется **принципом относительности Галилея**. Он означает, что любые механические процессы происходят одинаково, какую бы инерциальную систему отсчета мы ни выбрали (при одинаковых начальных условиях).

При переходе от одной системы отсчета к другой могут изменяться скорость тела, его перемещение и даже траектория, но не законы движения.

*Лабораторные работы*

**Изучение взаимодействия тел**

**Цель:** сравнение сил взаимодействующих тел.

**Оборудование:** два динамометра, набор грузов, брусок, дощечка, баночка пластмассовая, нитки, штатив, сосуд с водой.

Проделайте следующие опыты по взаимодействию тел:

1. Взаимодействие двух динамометров (рис. 172).

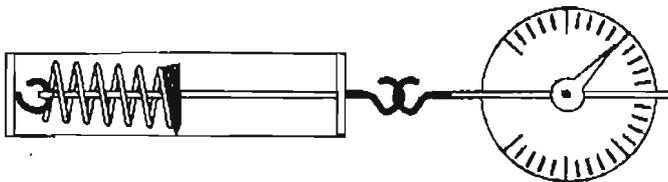


Рис. 172

2. Взаимодействие твердых тел при скольжении одного из них по поверхности другого (рис. 173).

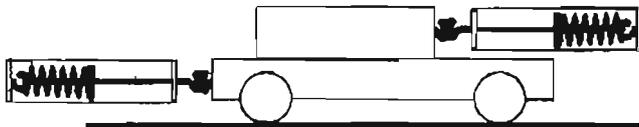


Рис. 173

3. Взаимодействие жидкости и погруженного в нее твердого тела (рис. 174).

Убедитесь в том, что жидкость действует на тело с некоторой силой, направленной вертикально вверх. Подвесьте груз к крючку динамометра, измерьте силу тяжести  $F_{тяж}$ , поместите груз в воду и измерьте силу упругости пружины  $F_y$ . Определите силу, с которой вода действует на тело:

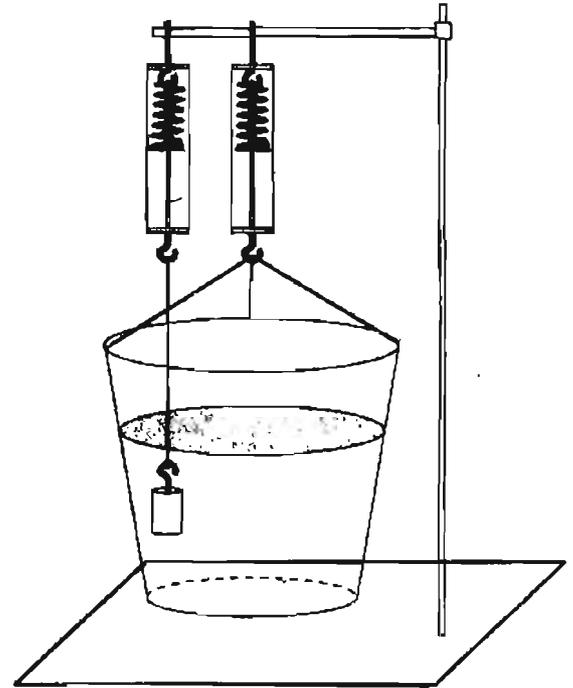


Рис. 174

$$F = F_{тяж} - F_y$$

В соответствии с третьим законом Ньютона такая же сила действует со стороны твердого тела на жидкость. Для проверки этого утверждения достаточно подвесить сосуд с жидкостью к пружине динамометра.

Проделайте опыт, изображенный на рис. 174, результаты запишите в табл. 10 и оцените погрешность, с которой вы можете убедиться в справедливости третьего закона.

Таблица 10. Третий закон Ньютона при взаимодействии твердого тела и жидкости

Сила тяжести, действующая на груз $F_{Тг}$ , Н	
Сила упругости пружины динамометра при погруженном в воду грузе $F_y$ , Н	
Сила, действующая на груз со стороны жидкости $F$ , Н	
Сила тяжести, действующая на сосуд с водой $F_{Тс}$ , Н	
Показания динамометра, на котором висит сосуд с погруженным в него грузом $F_0$ , Н	
Сила давления груза на воду $F_d$ , Н	

Какие ответы в результате проделанных вами опытов можно дать на вопросы:

- о модуле сил взаимодействия;
- о направлении векторов сил взаимодействия;
- о приложении этих сил.

*Практикум по  
решению задач*

### Примеры решения задач

#### Пример 1

Два тела массой  $m_1$  и  $m_2$ , связанные нитью, лежат на гладкой горизонтальной поверхности. Масса нити  $m_0$ . На второе тело подействовала в горизонтальном направлении сила  $\vec{F}$ . Определите силы, с которыми нить действует на каждое тело. В каком случае эти силы будут равны по модулю?

#### Решение

Изобразим нескомпенсированные силы, действующие на каждое тело и нить (рис. 175). Здесь  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$  — силы, с которыми нить действует на тела  $m_1$  и  $m_2$ ;  $\vec{F}'_1$  и  $\vec{F}'_2$  — силы, с которыми тела действуют на нить.

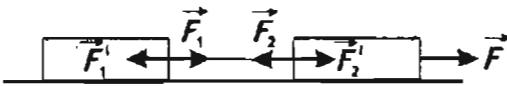


Рис. 175

Сила тяжести, действующая на каждое тело, скомпенсирована в данной задаче силами реакции опоры.

Применим второй закон Ньютона для проекций всех сил на направление движения системы тел — ось  $O_x$ :

$$\begin{aligned} F_{1x} &= m_1 a_{1x}; \\ F_{2x} + F'_{1x} &= m_0 a_{0x}; \\ F_x + F_{2x} &= m_2 a_{2x}. \end{aligned}$$

Подставив в уравнения значения проекций сил  $F_{1x} = F_1$ ;  $F'_{1x} = -F'_1$ ;  $F_{2x} = -F_2$ ;  $F_x = F$  и учитывая, что в случае нерастяжимой нити ускорения обоих тел и нити одинаковы:  $a_{1x} = a_{0x} = a_{2x} = a$ , получим:

$$\begin{aligned} F_1 &= m_1 a; \\ F'_1 + F'_2 &= m_0 a; \\ F + F_2 &= m_2 a. \end{aligned}$$

Так как по третьему закону Ньютона  $F_1 = F'_1$  и  $F_2 = F'_2$  из последней системы уравнений получим:

$$a = \frac{F}{m_1 + m_2 + m_0}.$$

Тогда силы  $F_1$  и  $F_2$ , с которыми нить действует на тела, определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{F m_1}{m_1 + m_2 + m_0}; \\ F_2 &= \frac{F(m_1 + m_0)}{m_1 + m_2 + m_0}. \end{aligned}$$

Мы нашли, что силы  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$  равны по модулю только в том случае, когда масса нити равна нулю. Следовательно, при малой массе нити можно считать, что тела действуют друг на друга с равными по модулю и противоположно направленными силами.

#### Решить самостоятельно

1. На столе лежит книга. Можно ли утверждать, что силы, с которыми книга действует на стол и стол — на книгу, уравновешивают (компенсируют) друг друга? Почему?
2. Гирия стоит на столе. Какие силы действуют на гирию и обеспечивают равновесие гири? Какие силы действуют на стол и обеспечивают равновесие стола?
3. Два мальчика тянут динамометр в противоположные стороны, причем оба остаются неподвижными. Каково показание динамометра, если один из мальчиков может развить силу 300 Н, а второй — 200 Н?
4. Будет ли двигаться космонавт в условиях невесомости, если он бросит от себя какой-либо массивный предмет?
5. Трудно ли автомобилю тронуться с места на обледенелой улице?
6. В опытах Отто Герике с магдебургскими полушариями, между которыми создается вакуум, с каждой стороны в полушария впрягалось по 8 лошадей. Изменилась бы тяга, если бы прикрепить одно полушарие к стене, а к другому припрячь 8 лошадей? 16 лошадей?
7. На одну чашку весов поставили сосуд с водой, а на другую — штатив с лапкой, к концу кото-

рой привязан груз (рис. 176). После уравновешивания весов груз опустили в воду. Изменится ли равновесие?

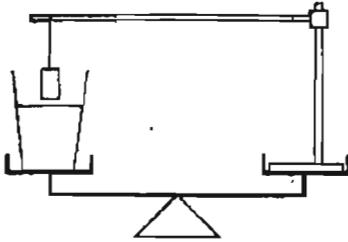


Рис. 176

8. Изменится ли равновесие весов в предыдущей задаче, если штатив и сосуд с водой будут находиться на одной чашке весов?
9. Теннисный мяч падает на Землю. Сравните модули силы, действующей на Землю со стороны

мяча, и силы, действующей на мяч со стороны Земли.

10. Теплоход при столкновении с байдаркой может потопить ее без всяких для себя повреждений. Противоречит ли это третьему закону Ньютона?
11. Дайте краткие ответы (да или нет) на следующие вопросы, относящиеся к силам действия и противодействия. Эти силы:
  - А. равны по модулю;
  - Б. приложены к разным телам;
  - В. не могут быть уравновешены;
  - Г. направлены в противоположные стороны;
  - Д. имеют одну и ту же природу.

Проанализируйте табл. 11 «Законы Ньютона» и сравните законы по признакам, приведенным в первом столбце таблицы.

Таблица 11. Законы Ньютона

	Первый закон	Второй закон	Третий закон
Физическая система	Макроскопическое тело		Система двух тел
Модель	Материальная точка		Система двух материальных точек
Описываемое явление	Состояние покоя или равномерного прямолинейного движения	Движение с ускорением	Взаимодействие тел
Суть закона	Постулирует существование инерциальной системы отсчета $\sum \vec{F} = \vec{0} \rightarrow \vec{v} = const$	Взаимодействие определяет изменение скорости, т. е. ускорение $\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m}$	Силы действия и противодействия равны по модулю, противоположны по направлению, приложены к разным телам, одной природы $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$
Примеры проявления	Движение космического корабля вдали от притягивающих тел	Движение планет, падение тел на Землю, торможение и разгон автомобиля	Взаимодействие тел: Солнца и Земли, Земли и Луны, автомобиля и поверхности Земли, бильярдных шаров
Область применения	Инерциальные системы отсчета, макро- и мегамир. Движение со скоростями, много меньшими скорости света		

## 5. СИЛЫ В МЕХАНИКЕ: СИЛА ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

*Конспект.  
Таблицы. Схемы*

### Три основные силы в механике

Большинство механических явлений на Земле можно объяснить рассматривая три силы: тяжести, трения и упругости. Явления, происходящие с космическими объектами, объясняются силой всемирного тяготения (схема 11). Сила тяжести — это одно из проявлений силы всемирного тяготения.

### Закон всемирного тяготения

Закон тяготения открыт И. Ньютоном и имеет следующую формулировку: *сила гравитационного взаимодействия двух тел пропорциональна произведению масс тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:*

$$F = G \frac{mM}{r^2}$$

### СХЕМА 11



Гравитационная постоянная  $G$  была измерена впервые в 1798 г. Она равна  $6,75 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Нм}^2}{\text{кг}}$ . Схема одного из опытов по измерению гравитационной постоянной представлена на схеме 12.

Формула  $F = G \frac{mM}{r^2}$  может применяться для расчета сил всемирного тяготения, для однородных и слоистых тел шаровой формы, для двух материальных точек, для двух тел, одно из которых является шаром, другое — материальной точкой (схема 12).

Сила всемирного тяготения объясняет явления, происходящие в космическом пространстве.

В частности, именно из закона всемирного тяготения следуют полученные из наблюдений И. Кеплером законы движения планет. Так, Кеплер обнаружил, что для всех планет Солнечной системы

отношение  $\frac{R^3}{T^2} = \text{const}$ , где  $R$  — среднее расстояние планет от Солнца,  $T$  — их период обращения:

$$\frac{R_1^3}{T_1^2} = \frac{R_2^3}{T_2^2} = \frac{R_3^3}{T_3^2} = \dots$$

Закон всемирного тяготения объясняет образование приливов на Земле именно взаимодействием Луны и Земли. В результате действия Луны Земля получает ускорение:

$$a_0 = \frac{F}{M_3} = \frac{Gm_n M_3}{r_0^2 M_3} = G \frac{m_n}{r_0^2}$$

Часть мирового океана, находящаяся на ближней к Луне части Земли, имеет большее ускорение.

Действительно,  $a_1 = G \frac{m_n}{(R_0 - R_3)^2}$ . Эта часть океана имеет в системе отсчета, связанной с Землей, ускорение  $(a_0 - a_1)$ .

Часть мирового океана на противоположной стороне Земли имеет ускорение  $a_2 < a_0$ . Действительно,

$a_2 = G \frac{m_n}{(R_0 + R_3)^2}$  и эта часть океана «отстает» от Земли.

Вот почему прилив происходит и «под Луной», и на противоположной части Земли.

СХЕМА 12

**Сила всемирного тяготения**

Сила всемирного тяготения в космосе

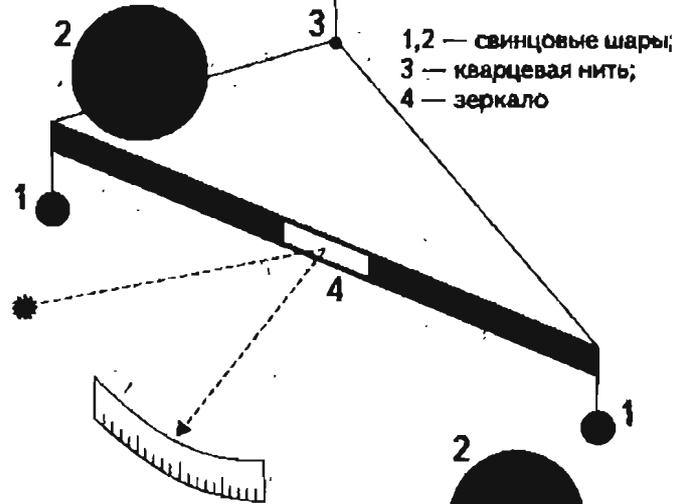


Образование приливов

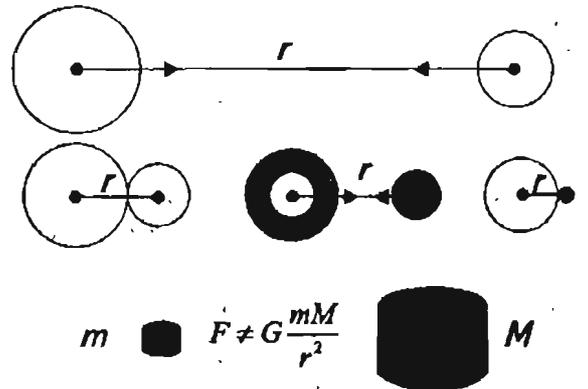


Определение гравитационной постоянной

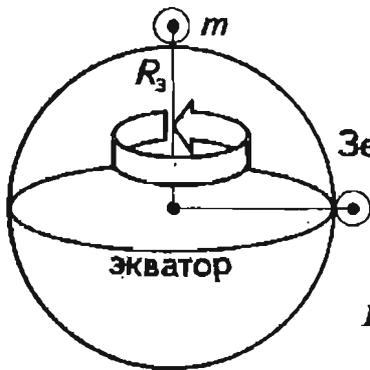
Г. Кавендиш 1797—98 гг.



1, 2 — свинцовые шары;  
3 — кварцевая нить;  
4 — зеркало



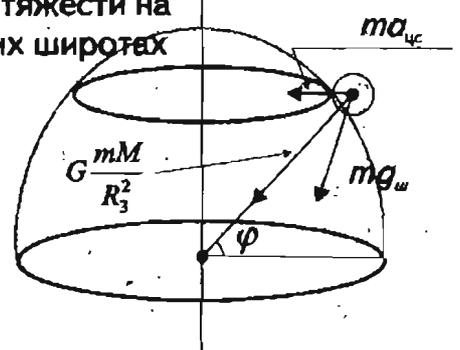
Сила тяжести на полюсе и экваторе



$$F_{\text{тяж}}^{\text{полюс}} = G \frac{M_3 m}{R_3^2}$$

$$F_{\text{тяж}}^{\text{экв}} = G \frac{M_3 m}{R_3^2} - m\omega^2 R_3 = mg_{\text{экв}}$$

Сила тяжести на других широтах



### Сила тяжести

Главная особенность силы тяжести состоит в следующем: у тел разной массы в данном месте Земли она вызывает одинаковое ускорение:  $a_1 = a_2 = g$  (рис. 177). Это свойство силы тяжести объясняет второй закон Ньютона и закон всемирного тяготения.

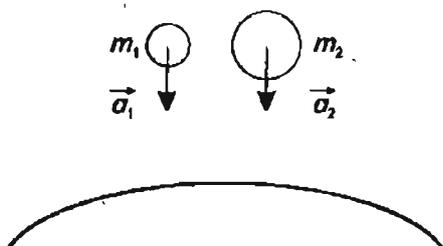


Рис. 177

Действительно, в соответствии со вторым законом Ньютона, ускорение обратно пропорционально массе и пропорционально силе, но сила всемирного тяготения пропорциональна массе тела, на которое она действует. Ускорение же этого тела не зависит от массы.

Второй закон Ньютона позволяет написать простую формулу для силы тяжести:  $\vec{F} = m\vec{g}$ .

Второй закон Ньютона и закон всемирного тяготения применимы к расчету силы тяжести:

$$mg = G \frac{M_3 m}{R_3^2} \rightarrow g = \frac{GM_3}{R_3^2}$$

Если же по этой формуле определить ускорение свободного падения на различных широтах, то только на полюсе будет получено совпадение с экспериментом, данные которого приведены ранее.

Расхождение объясняется тем, что система отсчета, связанная с Землей, вращается, т. е. не является строго инерциальной. Поэтому во всех точках Земли приходится от силы  $F_{\text{тяг}}$  отнимать  $m\vec{a}_{\text{цс}}$  в соответствии с векторным характером сил.

Учет неинерциальности системы отсчета, связанной с Землей, приводит к уточнениям, не превышающим 3%. И это учитывается только в задачах повышенной трудности, в которых данное условие оговаривается специально.

Если таких оговорок нет, то при анализе зависимости  $g$  от высоты используется формула:

$$g_h = G \frac{M}{(R+h)^2},$$

где  $M$  — масса Земли (или другой планеты),  $R$  — радиус Земли (или другой планеты),  $h$  — высота над поверхностью. Именно в соответствии с этой формулой проведены расчеты зависимости ускорения  $g$  от высоты, приведенные ранее.

### Практикум по решению задач

#### Пример 1

Тело брошено под углом  $\alpha_0 = 45^\circ$  к горизонту со скоростью  $v_0 = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Определите скорость и координаты тела через  $t = 1$  с после начала движения.

#### Решение

В качестве тела отсчета выберем Землю. Начало отсчета системы координат поместим в точку, из которой тело начало двигаться. Ось  $Oy$  направим вертикально вверх, а ось  $Ox$  расположим так, чтобы вектор скорости лежал в плоскости  $xOy$  (рис. 178).

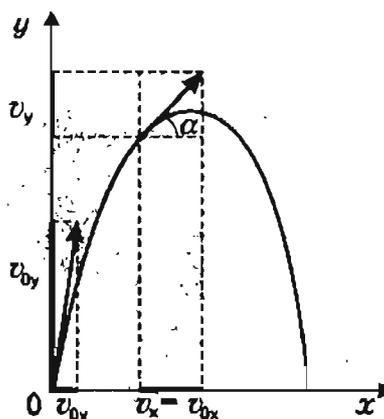


Рис. 178

В этом случае движение будет происходить в указанной плоскости и для определения положения тела нужно знать лишь две координаты. Движение тела происходит только под действием силы тяготения  $F = G \frac{mM_3}{R_3^2}$ , где  $M_3$  — масса Земли,  $R_3$  — расстояние между телом и центром Земли. Поскольку радиус Земли значительно больше размера тела, то, обозначив  $G \frac{mM_3}{R_3^2} = g$ , можно записать:  $F = mg$ .

За начало отсчета времени примем момент бросания тела. Запишем начальные условия:

$$x_0 = 0; y_0 = 0;$$

$$v_{0x} = v_0 \cos \alpha_0; v_{0y} = v_0 \sin \alpha_0;$$

$$a_x = 0; a_y = -g.$$

Проекции скорости на оси координат равны:

$$v_x = v_{0x} + a_x t,$$

$$v_y = v_{0y} + a_y t.$$

Используя начальные условия, получим:

$$v_x = v_0 \cos \alpha_0,$$

$$v_y = v_0 \sin \alpha_0 - gt.$$

Отсюда можно определить модуль и направление вектора скорости в любой момент времени  $t$ .

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 \cos^2 \alpha_0 + (v_0 \sin \alpha_0 - gt)^2},$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_y}{v_x} = \frac{v_0 \sin \alpha_0 - gt}{v_0 \cos \alpha_0},$$

где  $\alpha$  — угол наклона вектора скорости тела к горизонтальной плоскости в момент  $t$ .

Подставив числовые данные, получим:

$$v \approx 14,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}; \operatorname{tg} \alpha \approx 0,3; \alpha = 17^\circ.$$

Координаты тела в любой момент времени равны:

$$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2};$$

$$y = y_0 + v_{0y} t + \frac{a_y t^2}{2}.$$

Используя начальные условия, можно записать:

$$x = v_0 \cos \alpha_0 t + \frac{a_x t^2}{2};$$

$$y = v_0 \sin \alpha_0 t - \frac{gt^2}{2}.$$

Подставляя числовые данные, получим:

$$x = 14 \text{ м};$$

$$y = 9 \text{ м}.$$

### Пример 2

Каким должен быть радиус круговой орбиты искусственного спутника Земли, чтобы он все время находился над одной и той же точкой земной поверхности на экваторе?

### Решение

Для того чтобы спутник, двигаясь по круговой орбите, находился все время над одной и той же точкой земной поверхности на экваторе, необходимо, чтобы период обращения спутника вокруг Земли  $T_c$  был равен периоду обращения Земли вокруг своей оси  $T_p$ .

В качестве тела отсчета выберем Солнце. Так как масса спутника много меньше массы Земли, ускорение Земли можно считать пренебрежимо малым. В этом случае для определения ускорения спутника можно применять второй закон Ньютона. Центробежное ускорение спутника создается

силой притяжения его к Земле:  $a = \frac{F}{m}$ .

Подставляя значения ускорения и силы тяготения в формулы

$$a = \frac{v^2}{R} = \frac{\left(\frac{2\pi R}{T_c}\right)^2}{R} = \frac{4\pi^2}{T_c^2} R; \quad F = G \frac{mM}{R^2},$$

где  $R$  — радиус орбиты;  $M$  — масса Земли, получим:

$$m \frac{4\pi^2}{T_c^2} R = G \frac{mM}{R^2},$$

$$R = \sqrt[3]{\frac{GMT_c^2}{4\pi^2}} = \sqrt[3]{\frac{GMT_3^2}{4\pi^2}}.$$

Расчеты дают следующий результат:

$$R = \sqrt[3]{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 6 \cdot 10^{24} \cdot 86400^2}{4\pi^2}} = 4,2 \cdot 10^7 \text{ (м)}.$$

### Пример 3

Определите ускорение силы тяжести на Солнце по следующим данным: расстояние от Земли до Солнца  $R = 1,5 \cdot 10^{11}$  м, угол, под которым видно Солнце с Земли,  $\alpha = 10^{-2}$  рад, период обращения Земли вокруг Солнца  $T = 1 \text{ год} \approx 3 \cdot 10^7$  с.

### Решение

Ускорение силы тяжести на Солнце  $g_c$  определим, применив второй закон Ньютона. Для тела массой  $m$ , находящегося вблизи поверхности Солнца:

$$G \frac{mM_c}{R_c^2} = mg_c \rightarrow g_c = G \frac{M_c}{R_c^2} \quad (1).$$

Таблица 12. Движение тел под действием силы тяжести

Начальные условия		Описание движения	
Начальная координата	Начальная скорость	Формулы	Траектория
$y_0 = h$		$v = -gt$ $y = h - \frac{gt^2}{2}$	
$y_0 = h$		$v = -v_0 - gt$ $y = h - v_0 t - \frac{gt^2}{2}$	
$y_0 = 0$		$v = v_0 - gt$ $y = v_0 t - \frac{gt^2}{2}$	
$y_0 = 0$		$v_x = v_0 \cos \alpha$ $v_y = v_0 \sin \alpha - gt$ $x = v_0 t \cos \alpha$ $y = v_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}$	
$y_0 = h$		$v_x = v_0$ $v_y = -gt$ $x = v_0 t$ $y = h - \frac{gt^2}{2}$	
$y_0 = R_3 + h$ $x_0 = 0$ $v_0 = 8 \text{ км/с}$		$v_x = v_0 \cos \alpha$ $v_y = v_0 \sin \alpha$ $x = (R_3 + h) \sin \frac{2\pi}{T} t$ $y = (R_3 + h) \cos \frac{2\pi}{T} t$	

Радиус Солнца  $R_c$  рассчитаем, зная угол  $\alpha$  и расстояние  $R$  от Земли до Солнца (рис. 179):

$$\alpha = \frac{2R_c}{R} \rightarrow R_c = \frac{\alpha R}{2} \quad (2)$$

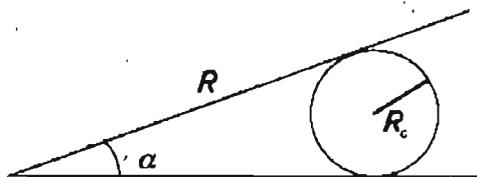


Рис. 179

Массу Солнца  $M_c$  рассчитаем, применив второй закон Ньютона для Земли массой  $M_3$ , движущейся вокруг Солнца:

$$G \frac{M_3 M_c}{R^2} = M_3 \frac{4\pi^2}{T^2} R \rightarrow M_c = \frac{4\pi^2 R^3}{G T^2} \quad (3)$$

Из уравнений (1), (2) и (3) получаем:

$$g_c = \frac{16\pi^2 R}{\alpha^2 T^2}; g_c \approx 265 \frac{M}{c^2}$$

Пример 4

Докажите, что первая космическая скорость равна

$$v_1 = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3 + h}}$$

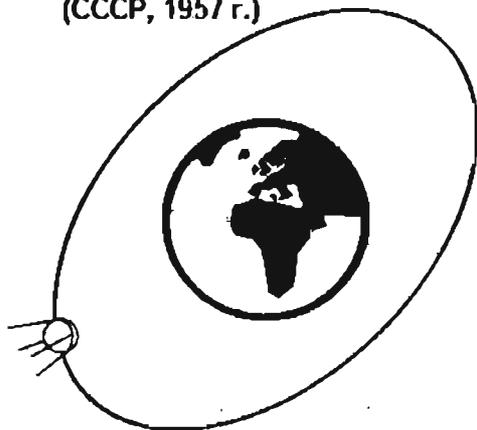
Доказательство

Первая космическая скорость — это скорость равномерного движения спутника Земли по окружности на высоте  $h$  (схема 13). На спутник действует

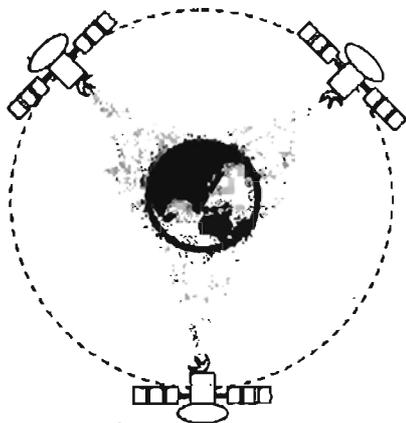
### СХЕМА 13

## Искусственные спутники Земли

Первый искусственный спутник Земли (СССР, 1957 г.)



Глобальная система связи



Первая космическая скорость

$$v_1 = \sqrt{gR}$$

$$v_{1h} = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3 + h}}$$

$$v_1 = 7,9 \frac{KM}{c}$$

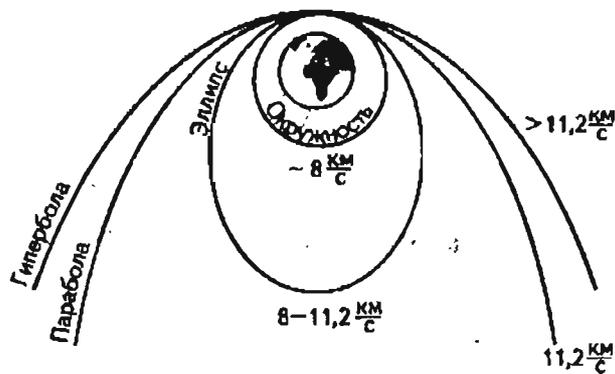
Вторая космическая скорость

$$v_2 = \sqrt{2gR} = \sqrt{2} \cdot v_1$$

$$v_2 = 11,2 \frac{KM}{c}$$

Третья космическая скорость

$$v_3 = 16,7 \frac{KM}{c}$$



сила тяготения  $F = G \frac{M_3 m}{(R+h)^2}$ . В соответствии со вторым законом:  $F = m \frac{v_1^2}{R_3 + h}$ .

Итак,  $G \frac{M_3 m}{(R+h)^2} = m \frac{v_1^2}{R_3 + h}$ . Отсюда следует, что:

$$v_1 = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3 + h}}$$

### Пример 5

При какой продолжительности суток сила тяжести, действующая на тела, расположенные на экваторе Земли, весили бы в два раза меньше, чем на полюсе? Радиус Земли примите равным  $6,4 \cdot 10^6$  м.

### Решение

Вес тела на полюсе по модулю равен силе тяготения:

$$P_n = G \frac{mM}{R^2} \quad (1),$$

где  $m$  и  $M$  — массы тела и Земли,  $R$  — радиус Земли.

На экваторе, вследствие вращения Земли, вес тела уменьшается на величину  $ma_{\text{ц}}$  (схема 12):

$$P_s = G \frac{mM}{R^2} - m \frac{4\pi^2}{T^2} R \quad (2).$$

Так как по условию задачи  $P_s = \frac{P_n}{2}$ , то можно записать:

$$G \frac{mM}{R^2} - m \frac{4\pi^2}{T^2} R = \frac{GmM}{2R^2}.$$

Откуда следует, что искомый период равен:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{2R^3}{GM}}.$$

Учтя, что  $GM = gR^2$ , получим:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{2R}{g}} \approx 7180 \text{ с} \approx 2 \text{ часа}.$$

### Решить самостоятельно

1. Определите массу Солнца, считая, что Земля обращается вокруг него по круговой орбите радиусом  $R = 1,5 \cdot 10^{11}$  м.

2. Определите массу планеты Марс, если известно, что спутник Марса — Фобос обращается вокруг него по орбите радиусом  $R = 9400$  км с периодом  $T = 7$  ч 39 мин.

3. Космический корабль движется по круговой орбите вокруг Земли с угловой скоростью, равной угловой скорости вращения Луны вокруг Земли. Во время движения корабль находится на прямой, соединяющей центры Земли и Луны, на таком расстоянии от Земли, что силы притяжения, действующие на него со стороны Земли и Луны, равны друг другу. Рассчитайте это расстояние ( $l$ ). Работают ли двигатели корабля? Если работают, то в какую сторону происходит выброс газов из двигателей? Период обращения Луны вокруг Земли равен 27,3 сут., отношение масс Земли и Луны равно 81, расстояние от Земли до Луны составляет 60 земных радиусов, а радиус Земли 6400 км.

4. Определите силу, с которой Земля, радиус которой  $R$ , притягивает тело массой  $m$ , находящееся в шахте глубиной  $h$ . Плотность Земли на различной глубине в расчетах примите одинаковой.

5. Считая Землю шаром радиусом  $R = 6,4 \cdot 10^6$  м, определите изменение силы тяжести, действующей на тело массой  $m = 1$  кг, при перемещении его с полюса на экватор.

6. При какой продолжительности суток на Земле сила тяжести, действующая на тело, расположенное на экваторе, была бы равна нулю? Радиус Земли примите равным  $R = 6,4 \cdot 10^6$  м.

Комбинированные  
работы

### Вариант 1

1. Какая из приведенных ниже формул выражает закон всемирного тяготения?

А.  $\vec{F} = m\vec{a}$ .       Б.  $F = \mu N$ .

В.  $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$ .       Г.  $F_x = -kx$ .

Д. Среди ответов А–Г нет правильного.

2. Космический корабль удаляется от Земли. Как изменится сила тяготения, действующая со сто-

роны Земли на ракету, при увеличении расстояния до центра Земли в 2 раза?

- А. Не изменится.  
 Б. Уменьшится в 2 раза.  
 В. Увеличится в 2 раза.  
 Г. Уменьшится в 4 раза.  
 Д. Увеличится в 4 раза.

3. Вокруг планеты массой  $M$  движется спутник массой  $m$ . Какое утверждение о силе гравитационного притяжения, действующего со стороны планеты на спутник, правильно?

- А. Прямо пропорциональна массе  $M$  и не зависит от  $m$ .  
 Б. Прямо пропорциональна массе  $m$  и не зависит от  $M$ .  
 В. Прямо пропорциональна произведению масс  $mM$ .  
 Г. Прямо пропорциональна частному масс  $\frac{M}{m}$ .  
 Д. Не зависит ни от  $M$  ни от  $m$ .

4. Масса Луны  $m$ , масса Земли  $M$ , расстояние от центра Земли до центра Луны  $R$ . Чему равна скорость движения Луны по круговой орбите вокруг Земли? Гравитационная постоянная  $G$ .

- А.  $\sqrt{\frac{GM}{R}}$        Б.  $\sqrt{\frac{Gm}{R}}$   
 В.  $\sqrt{\frac{2GM}{R}}$        Г.  $\sqrt{\frac{2Gm}{R}}$   
 Д.  $\sqrt{\frac{GM}{2R}}$        Е.  $\sqrt{\frac{Gm}{2R}}$

5. При свободном падении с крыши дома целый кирпич долетит до поверхности Земли за 2 с. Сколько времени будет длиться падение с той же крыши половинки кирпича?

- А. 2 с.       Б. 4 с.  
 В.  $2\sqrt{2}$  с.       Г. 1 с.  
 Д.  $\frac{2}{\sqrt{2}}$  с.

6. Масса Луны примерно в 81 раз меньше массы Земли. Чему равно отношение силы всемирного тяготения  $F_1$ , действующей со стороны Земли на Луну, к силе  $F_2$ , действующей со стороны Луны на Землю?

- А.  $\frac{1}{81}$        Б.  $\frac{1}{9}$   
 В. 1.       Г. 9.  
 Д. 81.

### Вариант 2

1. По какой из приведенных ниже формул вычисляется сила тяжести?

- А.  $\vec{F} = m\vec{a}$ .       Б.  $F = \mu N$ .  
 В.  $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$ .       Г.  $F_x = -kx$ .  
 Д. Среди ответов А–Г нет правильного.

2. Космическая ракета приближается к Земле. Как изменится сила тяготения, действующая со стороны Земли на ракету, при уменьшении расстояния до центра Земли в 2 раза?

- А. Не изменится.  
 Б. Уменьшится в 2 раза.  
 В. Увеличится в 2 раза.  
 Г. Уменьшится в 4 раза.  
 Д. Увеличится в 4 раза.

3. Вокруг планеты массой  $M$  движется спутник массой  $m$ . Какое утверждение о силе гравитационного притяжения, действующего со стороны спутника на планету, правильно?

- А. Прямо пропорциональна массе  $M$  и не зависит от  $m$ .  
 Б. Прямо пропорциональна массе  $m$  и не зависит от  $M$ .  
 В. Прямо пропорциональна произведению масс  $mM$ .  
 Г. Прямо пропорциональна частному масс  $\frac{M}{m}$ .  
 Д. Не зависит ни от  $M$  ни от  $m$ .

4. Масса Земли  $m$ , масса Солнца  $M$ , расстояние от центра Земли до центра Солнца  $R$ . Чему равна

скорость движения Земли по круговой орбите вокруг Солнца? Гравитационная постоянная  $G$ .

- А.  $\sqrt{\frac{Gm}{2R}}$        Б.  $\sqrt{\frac{GM}{2R}}$   
 В.  $\sqrt{\frac{2Gm}{R}}$        Г.  $\sqrt{\frac{2GM}{R}}$   
 Д.  $\sqrt{\frac{Gm}{R}}$        Е.  $\sqrt{\frac{GM}{R}}$

5. Камень массой 2 кг при свободном падении с балкона долетит до поверхности Земли за 1 с. За какое время произойдет свободное падение с того же балкона мяча массой 100 г?

- А. 0,5 с.       Б.  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  с.  
 В. 1 с.       Г. 2 с.  
 Д. 4 с.

6. Масса Земли примерно в 330 000 раз меньше массы Солнца. Чему равно отношение силы всемирного тяготения  $F_1$ , действующей со стороны Солнца на Землю, к силе  $F_2$ , действующей со стороны Земли на Солнце?

- А. 330 000.       Б. 575.  
 В.  $\frac{1}{575}$        Г.  $\frac{1}{330000}$   
 Д. 1.

**Контрольная работа повышенного уровня сложности**

**Вариант 1**

- Чему равен минимальный период обращения спутника нейтронной звезды, плотность вещества которой равна  $\rho = 10^{17} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ?
- Чему равно ускорение Луны при ее орбитальном движении вокруг Земли? Считать, что расстояние от Земли до Луны равно 60 земных радиусов ( $L = 60R$ ).
- Чему равен период обращения спутника Земли, если радиус его орбиты  $4 \cdot 10^8$  м?

**Вариант 2**

- Считая Землю шаром радиусом  $R = 6,4 \cdot 10^6$  м, определите угол отклонения отвеса от направления силы тяготения на широте.
- Чему равно ускорение свободного падения на высоте, равной радиусу Земли?
- Чему равно ускорение свободного падения на Луне? Масса Луны равна  $M_{\text{л}} = 713 \cdot 10^{22}$  кг, а ее радиус  $R_{\text{л}} = 1700$  км.

*Творческие задания*

1. Считая орбиты планет круговыми, выведите эмпирический закон Кеплера, утверждающий, что отношение  $\frac{R^3}{T^2}$  является для всех планет Солнечной системы одинаковым:

$$\frac{R^3}{T^2} = \frac{G}{4\pi^2} M_{\text{с}}$$

- Воспользуйтесь результатами астрономических наблюдений, приведенных в табл. 13, и убедитесь в постоянстве отношения  $\frac{R^3}{T^2}$ .
- Какой эмпирический закон открыл бы Кеплер, если бы закон всемирного тяготения имел вид:

$$F = G \frac{mM}{R^3} ?$$

Таблица 13. Элементы планетных орбит

Планета	Среднее расстояние планеты от Солнца (в астроном. ед.)	Период обращения $T$ планеты вокруг Солнца (в годах)
Меркурий	0,4	0,25
Венера	0,7	0,6
Земля	1,0	1,0
Марс	1,5	1,9
Юпитер	5,2	11,9
Сатурн	9,5	29,5

## 6. СИЛЫ В МЕХАНИКЕ: СИЛА УПРУГОСТИ, ЗАКОН ГУКА. ВЕС ТЕЛА

*Конспект.  
Таблицы. Статьи*

### Типы деформаций

Под действием внешних сил твердые тела изменяют свою форму: удлиняются, сжимаются, изгибаются и т.д. Чтобы представить себе различные типы деформаций, воспользуемся следующей грубой моделью твердого деформируемого тела (рис. 180): скрепим параллельно друг другу ряд деревянных пластин с помощью одинаковых пружинок (рис. 180, а). Пластины изображают элементарные слои, на которые разбито тело, а пружинки — связи, действующие между ними.

Удерживая нижнюю пластину на столе и прикладывая внешнюю силу перпендикулярно верхней пластине в направлении от тела, получим деформацию растяжения (рис. 180, б); в направлении к телу — деформацию сжатия (рис. 180, в). При этом если точки пластин, лежащие на одной вертикали, не смещаются с нее, а расстояния между смежными слоями (пластинами) остаются во всех точках одинаковыми, то деформации называются **однородным растяжением** или **однородным сжатием**.

Если действующая сила лежит в плоскости верхней пластины, а нижняя удерживается в покое, то отдельные части модели сдвигаются параллельно самим себе (рис. 180, г). Если точки в слое сдвинуты на одну и ту же величину, то деформация называется **чистым или однородным сдвигом**.

Из рисунка видно, что деформация сдвига может быть представлена в виде деформаций растяжения в направлении диагонали  $AB$  и сжатия в направлении диагонали  $CD$ .

Надавливая на один из краев верхней пластины, получим деформацию изгиба (рис. 180, д). При этом расстояние между пластинами с одной стороны увеличивается, а с другой стороны уменьшается. В средней части модели должен существовать слой, который только изгибается, но не меняет свои размеры, слой этот называется **нейтральным**. Таким образом, деформация изгиба сводится к деформациям неоднородного растяжения и сжатия.

Наконец, поворачивая верхний слой в его плоскости, получим деформацию кручения (рис. 180, е). При этом точки пластин, лежащие на одной вертикали, сдвигаются друг относительно друга, причем, точки у края пластин оказываются сдвинутыми наиболее сильно. Точки, лежащие на оси вращения, не смещаются вовсе. Таким образом, деформация кручения может быть сведена к деформации неоднородного сдвига.

В теории упругости доказывается, что все типы деформаций могут быть сведены (при условии, что они достаточно малы) к одновременно происходящим деформациям сжатия или растяжения и сдвига.

Абсолютная деформация (скажем, удлинение тела  $\Delta l$ ) под действием данной силы практически мало показательна. При удлинении на 1 мм тел длиной 10 мм и 10 м в первом случае деформация весьма

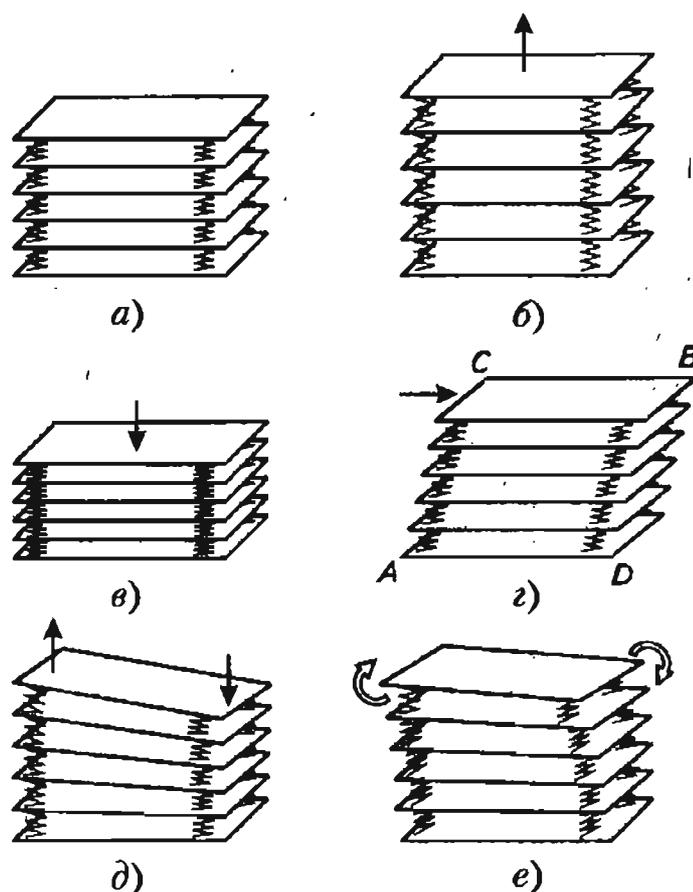


Рис. 180

заметна, а во втором настолько мала, что ею можно пренебречь. Поэтому степень деформации оценивают отношением изменения размеров тела  $\Delta x$  в результате деформации к размерам тела до деформации. Это отношение называют **относительной деформацией**:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x}$$

При деформациях растяжения и сжатия (которые объединяют названием продольных) тело изменяет свою длину на  $\pm \Delta l$ . Знак «плюс» соответствует растяжению, знак «минус» — сжатию. Относительная продольная деформация:

$$\varepsilon_L = \pm \frac{\Delta l}{l}$$

где  $l$  — длина тела до деформации.

Тела, в которых после прекращения действия внешней силы деформация полностью исчезает и восстанавливается первоначальная форма тела, называются **абсолютно упругими телами**.

Тела, которые не восстанавливают свою первоначальную форму после прекращения действия внешней силы, называются **неупругими** или **пластичными**.

В природе нет абсолютно упругих или абсолютно неупругих тел. При сравнительно небольших деформациях многие твердые тела (в частности, металлические) ведут себя как тела почти абсолютно упругие (остаточные деформации в них возникают, но они весьма малы).

### Закон Гука

Английский физик Р. Гук в 1675 г. на основе большого числа измерений установил, что для малых деформаций любого вида существует прямая пропорциональная связь между причиной, вызывающей деформацию, и относительной деформацией.

Всеобщий характер закона Гука связан с внутренними процессами, происходящими в твердом теле при деформации.

Атомы удерживаются на определенных местах пространственной решетки кристалла силами взаимодействия с соседними частицами. Расстояния между соседними атомами решетки таковы, что силы отталкивания и притяжения, действующие между ними, уравновешиваются. Кристаллы в по-

ликристаллических телах удерживаются друг около друга молекулярными силами.

Внешние силы, приложенные к телу, сдвигают его атомы или кристаллы со своих мест. Межатомные и межмолекулярные силы взаимодействия препятствуют этому, их результирующая в любом внутреннем сечении тела становится отличной от нуля. Направлена она против смещения частиц. Если сдвиг атомов или молекул внешней силой невелик, так что они остаются в окружении тех частиц, с которыми взаимодействовали до деформации, то после прекращения действия внешней силы частицы вернуться к прежнему взаимному положению. Если же в результате смещения атомы и молекулы сменяют «соседей» и начнут взаимодействовать с другими структурными элементами, то после прекращения действия внешней силы они уже не вернуться к прежнему положению. В первом случае деформация упругая, во втором пластичная.

Самый простой вид имеет формулировка закона Гука для деформации растяжения — сжатия твердых тел цилиндрической формы (схема 13). Проекция силы упругости деформации:  $F_x = -kx$ .

Характеристика упругих свойств тела  $k$  называется жесткостью:  $[k] = \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ . Графически закон Гука изображается прямой линией (схема 13). Для любого тела закон Гука выполняется в определенных границах, за пределами которых прямая пропорциональная связь между силой и деформацией нарушается.

### Вес тела

Одна из причин деформации тел, находящихся на Земле — это сила тяжести. В результате ее действия тела находятся в деформированном состоянии, внутри тел и при их контакте с другими телами возникают упругие силы. В связи с большой важностью этих сил для их названия используется специальный термин — вес тела.

**Вес тела** — это сила упругости, с которой данное тело действует на горизонтальную подставку и растягивает нить подвеса (рис. 181).

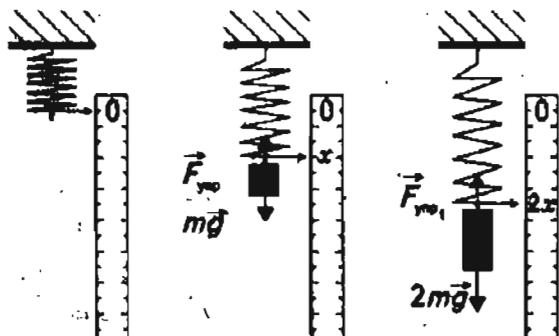
В инерциальной системе отсчета вес тела по модулю равен силе тяжести.

При ускоренном движении упругие силы на границах тела и подставок (подвесов), внутри тел изменяются, вес при этом также изменяется.

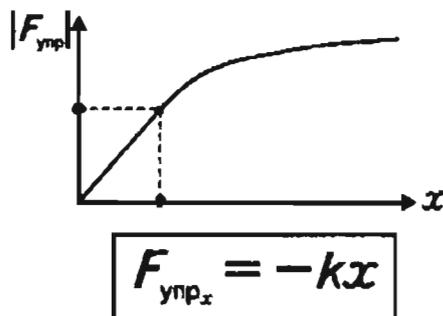
**СХЕМА 14**

**Упругие деформации**

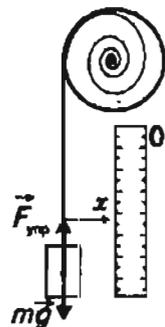
Деформация растяжения



Закон Гука



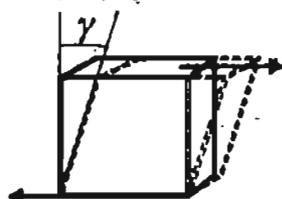
Деформация кручения



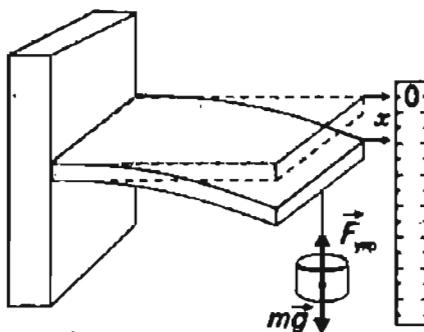
Деформация сжатия



Деформация сдвига



Деформация изгиба



Вес тела

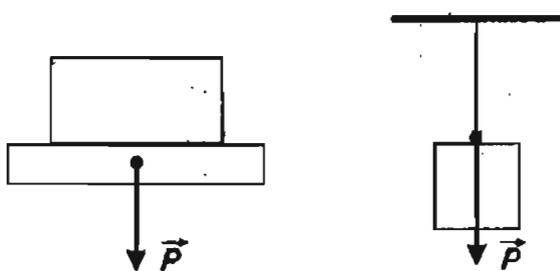
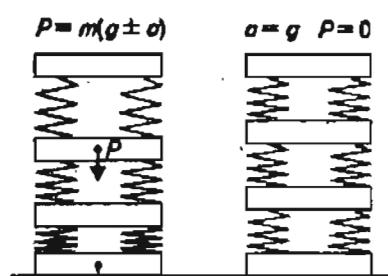


Рис. 181

Пусть ускорение лифта направлено вверх (лифт поднимается с ускорением либо опускается равнозамедленно). Рассмотрим силы, действующие на человека и пол лифта в инерциальной системе отсчета, связанной со зданием (рис. 182). Тогда можно записать:

$$F_{\text{упр}} - mg = ma_0.$$

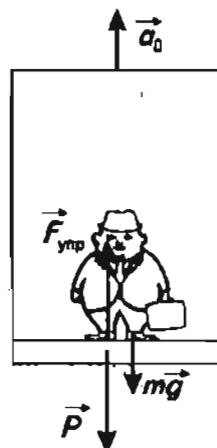


Рис. 182

Отсюда:  $F_{\text{упр}} = mg + ma_0$ .

По третьему закону Ньютона вес тела равен:

$$P = mg + ma_0 = m(g + a_0).$$

Увеличение веса тела будет наблюдаться при криволинейном движении (рис. 183), ведь вес определяется не скоростью, а ускорением.

Если вектор  $\vec{a}_0$  направлен вниз, то легко доказать, что:

$$P = m(g - a_0).$$

При  $a_0 = g$  вес  $P = 0$ .

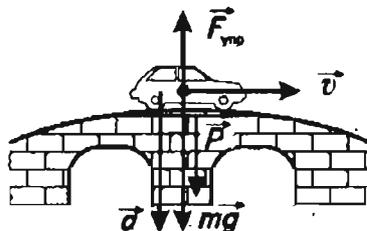


Рис. 183

*Лабораторные работы*

Цель работы: исследование диаграммы растяжения резинового образца; определение границ применимости закона Гука, оценка жесткости.

Оборудование: резиновый образец длиной около 50 см, спичечный коробок, мерная лента, набор монет различного достоинства.

Измерительная установка: создать измерительную установку проще всего в проеме двери (рис. 184). Для растяжения резины проще всего воспользоваться монетами, масса которых однозначно связана с их достоинством (табл. 4).

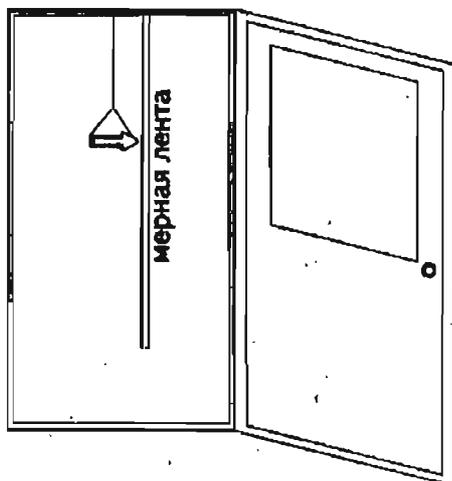


Рис. 184

В процессе нагружения коробки монетами измеряйте каждый раз удлинение  $X$  образца и запишите результаты в таблицу:

Таблица 14. Деформация резинового образца

Масса монет, г					
Сила тяжести, Н					
Сила упругости, Н					
Удлинение, м					

Постройте график зависимости силы упругости от деформации, определите границы упругой деформации, жесткость образца внутри этих границ.

*Практикумы по решению задач*

**Примеры решения задач**

**Пример 1**

Чему равен вес школьника массой 50 кг, находящегося в лифте, движущемся с ускорением  $0,8 \frac{м}{с^2}$ , направленным:

- а) вертикально вверх;
- б) вертикально вниз;
- в) при каких условиях школьник в лифте может испытать состояние невесомости?

**Решение**

а) На человека действуют сила реакции опоры  $\vec{N}$  и сила тяжести  $m\vec{g}$ . При движении лифта с ускорением  $\vec{a}$ , направленным вертикально вверх (рис. 185), равнодействующая сил  $\vec{N}$  и  $m\vec{g}$  со-

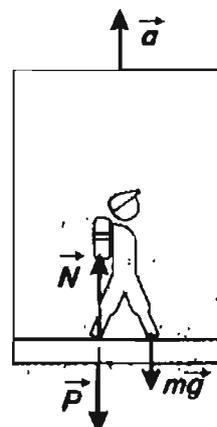


Рис. 185

обобщают телу ускорение  $\bar{a}$ . Запишем второй закон Ньютона:

$$N - mg = ma.$$

Отсюда:  $N = m(g + a)$ .

По третьему закону Ньютона вес тела  $\vec{P}$  равен по модулю силе  $\vec{N}$ , но направлен в противоположную сторону и приложен к лифту:

$$P = m(g + a); P = 530 \text{ Н.}$$

б) При движении лифта с ускорением  $\bar{a}$ , направленным вертикально вниз (рис. 186), из второго закона Ньютона:  $mg - N = ma$ , — следует:

$$N = m(g - a).$$

Так как  $\vec{P} = -\vec{N}$ , то модуль веса равен:

$$P = m(g - a); P = 450 \text{ Н.}$$

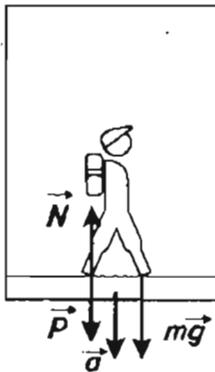


Рис. 186

в) При свободном падении лифта с ускорением  $\bar{g}$  вес школьника равен:

$$P = m(g - g) = 0.$$

Это состояние называется невесомостью.

### Пример 2

Какие «перегрузки» испытывает белье в центрифуге стиральной машины, если диаметр центрифуги  $D = 20$  см, а частота ее вращения составляет  $\nu = 3000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ .

Решение

«Перегрузкой» называют отношение веса  $P$  тела (в данной задаче — белья) в ускоренно движущейся системе отсчета (в центрифуге) к весу тела  $P_0$  в по-

$$\text{кое } k = \frac{P}{P_0}.$$

Учтя, что  $P_0 = mg$ ,  $P = ma_{\text{ц}} = m4\pi^2\nu^2 R$ , получим:

$$k = \frac{4\pi^2\nu^2 R}{g} = \frac{4\pi^2(50)^2 \cdot 0,1}{9,8} = 1000.$$

### Пример 3

Тело массой  $m = 1$  кг, подвешенное на нити длиной  $l = 1$  м, описывает в горизонтальной плоскости окружность с постоянной угловой скоростью, совершая  $1 \frac{\text{об}}{\text{с}}$ . Определите модуль силы упругости нити  $F$  и угол  $\alpha$ , который образует нить с вертикалью.

Решение

Во время движения тела на него действуют две силы: сила тяжести  $m\vec{g}$  и сила упругости  $\vec{F}$  нити (рис. 187). Влиянием остальных сил можно пренебречь. Равнодействующая сил равна произведению массы  $m$  на ускорение  $\bar{a}$ :

$$m\vec{g} + \vec{F} = m\bar{a}.$$

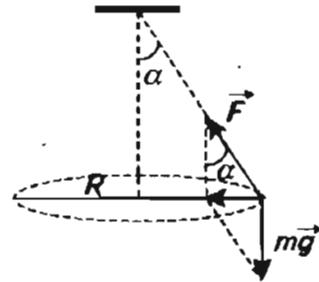


Рис. 187

Для определения силы упругости  $\vec{F}$  нити, т. е. для решения обратной задачи механики, необходимо знать ускорение тела при его движении по окружности радиуса  $R = l \sin \alpha$ .

Модуль этого ускорения определим из кинематических соотношений:

$$a = \frac{v^2}{R} = \frac{v^2}{l \sin \alpha}.$$

Как видно из рис. 187,  $F \sin \alpha = ma$ .

Отсюда:

$$F = \frac{ma}{\sin \alpha} = \frac{mv^2}{l \sin^2 \alpha}.$$

Так как  $v = \omega \cdot R = 2\pi\nu R = 2\pi\nu l \sin \alpha$ , то

$$F = 4\pi^2 m \nu^2 l.$$

Поскольку в вертикальном направлении ускорение равно нулю, сумма проекций всех сил на вертикальное направление равна нулю, то можно записать:

$$F \cos \alpha - mg = 0,$$

откуда следует, что  $\cos \alpha = \frac{mg}{F} = \frac{mg}{4\pi^2 m v^2 l} = \frac{g}{4\pi^2 v^2 l}$ .

Подставляя числовые значения, получим:

$$F = 1 \text{ кг} \cdot 4\pi^2 \cdot 1 \text{ с}^{-2} \cdot 1 \text{ м} \approx 40 \text{ Н},$$

$$\cos \alpha = \frac{10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{4\pi^2 \cdot 1 \text{ с}^{-2} \cdot 1 \text{ м}} = 0,25;$$

$$\alpha \approx 75,5^\circ.$$

#### Пример 4

Груз, подвешенный на пружине, растянул ее на  $\Delta x_1 = 14$  см. Определите растяжение пружины при ее движении вместе с грузом с ускорением  $2,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ , направленным вертикально вниз.

**Решение**

В инерциальной системе отсчета, связанной с Землей, на груз действует сила упругости  $\vec{F}$  и сила тяжести  $\vec{F}_T$ . Если груз с пружиной покоится, то уравнение второго закона Ньютона в проекциях на ось  $Ox$ , направленную вертикально вниз, можно записать в следующем виде:

$$F_x + F_{Tx} = ma_{1x}.$$

Подставляя в это уравнение значения проекций сил и ускорений  $F_{Tx} = mg$ ;  $F_x = -k\Delta x_1$ ;  $a_{1x} = 0$ , получим:  $mg - k\Delta x_1 = 0$ . Отсюда жесткость пружины  $k$  равна:

$$k = \frac{mg}{\Delta x_1}.$$

Если груз с пружиной движется вертикально вниз с ускорением  $a$ , то второй закон Ньютона в проекции на ось  $Ox$  запишется в виде:

$$F_x + F_{Tx} = ma_{2x}.$$

Подставляя в это уравнение значений проекций  $F_{Tx} = mg$ ;  $F_x = -k\Delta x_2$ ;  $a_{2x} = 0$ , получим:

$$mg - k\Delta x_2 = ma.$$

Растяжение пружины в этом случае определится из выражения:

$$\Delta x_2 = \frac{m(g-a)}{k} = \frac{m(g-a)}{mg} \Delta x_1 = \frac{g-a}{g} \Delta x_1.$$

Расчеты дают следующий результат:

$$\Delta x_2 = \frac{9,8 - 2,8}{9,8} \cdot 0,14; \Delta x_2 = 0,1 \text{ м}.$$

#### Пример 5

В вашем распоряжении две одинаковые пружины с жесткостью  $k$ . Чему будет равна жесткость двух пружин, соединенных последовательно? Параллельно?

**Решение**

При соединении двух пружин последовательно под действием одинаковой силы растяжение двух пружин будет в два раза больше, чем одной пружины. Следовательно, их жесткость:

$$k_{\text{обш}} = \frac{F}{2x} = \frac{k}{2},$$

уменьшится в два раза.

При параллельном соединении двух пружин растяжение их будет в два раза меньше, чем у одной пружины. Следовательно, их жесткость:

$$k_{\text{обш}} = \frac{F}{x} = 2k,$$

увеличится в два раза.

#### Решить самостоятельно

1. Вертикальный вал вращается с угловой скоростью  $\omega$ . С валом связан невесомый стержень длиной  $l$ , на конце которого укреплен груз массой  $m$ . Стержень может свободно отклоняться в вертикальной плоскости. На какой угол отклонится стержень от вертикали во время вращения вала (рис. 188)?
2. Грузы массами  $m_1 = 1,0$  кг и  $m_2 = 1,5$  кг связаны невесомой и нерастяжимой нитью. Нить перекинута через горизонтальный гладкий стержень. Найдите силу давления нити на стержень, если сила трения между нитью и стержнем равна нулю.
3. Шар, привязанный нитью к подвесу, описывает в горизонтальной плоскости окружность, имея постоянную скорость. Найдите скорость

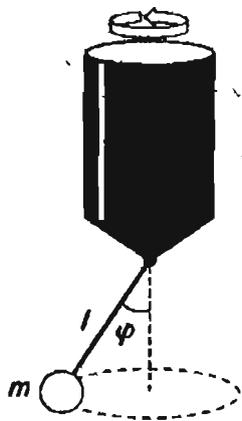


Рис. 188

шара и период его вращения по окружности, если длина нити  $l$ , а ее угол с вертикалью составляет  $\alpha$ .

4. Груз массой  $0,2$  кг, подвешенный на невесомой нити, отклонили от положения равновесия и отпустили. Какова зависимость силы натяжения нити от угла между нитью и вертикалью? Какова должна быть минимальная прочность нити, чтобы она смогла выдержать напряжение при прохождении маятником положения равновесия? Сопротивлением воздуха пренебречь.
5. Найдите зависимость скорости движения груза  $m_1$  от времени в системе, изображенной на рис. 189, если выполняются следующие соотношения:

$$m_1 = m_2; 2m_1 = m_2; m_1 \ll m_2; m_1 \gg m_2.$$

Массой блока и нити пренебречь.

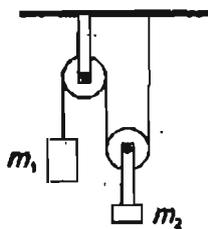


Рис. 189

6. Два небольших бруска массами  $m_1 = 0,3$  кг и  $m_2 = 0,7$  кг соединили нитью и положили на гладкую цилиндрическую поверхность симметрично ее вершине (рис. 190). Угол, образуемый радиусами цилиндрической поверхности, со-

единяющий бруски, равен  $120^\circ$ . Определите ускорение системы брусков.

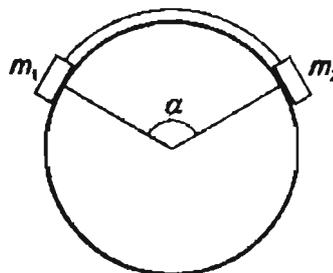


Рис. 190

7. Космическая ракета при старте с Земли движется вертикально вверх с ускорением  $30 \frac{M}{C^2}$ . Чему равны вес космонавта массой  $80$  кг в ракете и его перегрузка?
8. Парашютист, достигнув в затыжном прыжке скорости  $55 \frac{M}{C}$ , раскрыл парашют, после чего за  $2$  с его скорость уменьшилась до  $5 \frac{M}{C}$ . Чему равен вес парашютиста массой  $70$  кг во время торможения? Какова при этом его перегрузка?

Контрольная  
работы

### Вариант 1

1. Какая из приведенных ниже формул выражает закон Гука?
- А.  $\vec{F} = m\vec{a}$ .       Б.  $F = mN$ .
- В.  $F_x = -kx$ .       Г.  $F = G \frac{mM}{R^2}$ .
2. При столкновении двух вагонов буферные пружины жесткостью  $10^5 \frac{H}{M}$  сжались на  $10$  см. Чему равна максимальная сила упругости, с которой пружины воздействовали на вагон?
- А.  $10^4$  Н.       Б.  $2 \cdot 10^4$  Н.
- В.  $10^6$  Н.       Г.  $2 \cdot 10^8$  Н.
3. На рис. 191 представлены графики зависимости модулей сил упругости от деформаций для трех пружин. Жесткость какой больше?

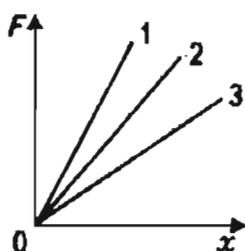


Рис. 191

- А. 1.                       Б. 2.  
 В. 3.                       Г. Жесткость всех трех пружин одинакова.

4. На полу лифта, движущегося в течение времени  $t$  вертикально вверх с постоянной скоростью  $v$ , лежит груз массой  $m$ . Чему равен модуль веса этого груза?

- А. 0.                       Б.  $mg$ .  
 В.  $m\left(g + \frac{v}{t}\right)$        Г.  $m\left(g - \frac{v}{t}\right)$

5. На полу лифта, начинающего движение вертикально вверх с ускорением  $a$ , лежит груз массой  $m$ . Чему равен модуль веса этого груза?

- А. 0.                       Б.  $mg$ .  
 В.  $m(g + a)$ .         Г.  $m(g - a)$ .

6. Сравните модуль веса тела на полюсе  $P_1$ , на средней широте  $P_2$  и на экваторе  $P_3$ .

- А.  $P_1 = P_2 = P_3$ .     Б.  $P_1 > P_2 > P_3$ .  
 В.  $P_1 < P_2 < P_3$ .     Г.  $P_3 < P_1 < P_2$ .

**Вариант 2**

1. Какая из приведенных ниже формул является выражением для силы упругости?

- А)  $\vec{F} = m\vec{a}$ .             Б.  $F = G \frac{mM}{R^2}$ .  
 В.  $F = mN$ .             Г.  $F_x = -kx$ .

2. При буксировке автомобиля буксирный трос с жесткостью  $10^6 \frac{H}{m}$  удлинился на 2 см. Чему равна сила упругости, с которой трос действует на автомобиль?

- А.  $0,5 \cdot 10^6 H$ .         Б.  $2 \cdot 10^6 H$ .  
 В.  $0,5 \cdot 10^4 H$ .         Г.  $2 \cdot 10^4 H$ .

3. На рис. 192 представлены графики зависимости модулей сил упругости от деформации для трех пружин. Жесткость какой меньше?

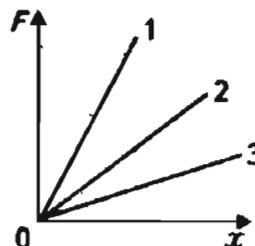


Рис. 192

- А. 1.                       Б. 2.  
 В. 3.                       Г. Жесткость всех трех пружин одинакова.

4. На полу лифта, движущегося вертикально вниз с постоянной скоростью  $v$ , лежит груз массой  $m$ . Чему равен модуль веса этого груза?

- А.  $mg$ .                       Б.  $m\left(g + \frac{v}{t}\right)$   
 В.  $m\left(g - \frac{v}{t}\right)$          Г. 0.

5. На полу лифта, начинающего движение вертикально вниз с ускорением  $a$ , лежит груз массой  $m$ . Чему равен модуль веса этого груза?

- А.  $mg$ .                       Б.  $m(g + a)$ .  
 В.  $m(g - a)$ .         Г. 0.

6. Сравните модуль веса тела на полюсе  $P_1$ , на средней широте  $P_2$  и на экваторе  $P_3$ .

- А.  $P_1 = P_2 = P_3$ .     Б.  $P_1 > P_2 > P_3$ .  
 В.  $P_1 < P_2 < P_3$ .     Г.  $P_3 < P_1 < P_2$ .

**Контрольная работа повышенного уровня сложности**

**Вариант 1**

1. На рис. 193 приведен график зависимости модуля силы упругости от удлинения пружины. Чему равна жесткость пружины?

- А.  $0,2 \frac{H}{m}$ .             Б.  $0,4 \frac{H}{m}$ .  
 В.  $2 \frac{H}{m}$ .                 Г.  $10 \frac{H}{m}$ .

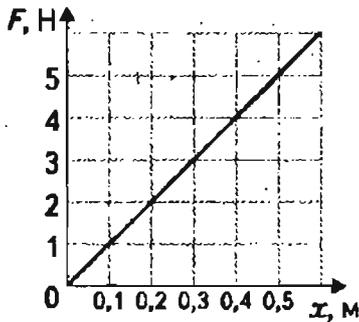


Рис. 193

2. Пружину, жесткость которой  $100 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ , разрезали на две равные части. Чему равна жесткость каждой пружины?

- А.  $50 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$        Б.  $100 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$   
 В.  $200 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$        Г.  $400 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$

3. Кабина лифта массой  $10^3 \text{ кг}$  начинает подъем с ускорением  $1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . Чему равно в начале подъема удлинение каната, на котором подвешен лифт, если жесткость каната  $10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ ? (Ускорение свободного падения принять равным  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .)

- А.  $0,9 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ .  
 Б.  $10^{-2} \text{ м}$ .  
 В.  $1,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ .  
 Г. Для расчета не хватает данных.

4. Космический корабль после выключения ракетных двигателей движется вертикально вверх, достигает верхней точки траектории и затем движется вниз. На каком участке траектории в корабле наблюдается состояние невесомости? Сопротивление воздуха пренебрежимо мало.

- А. Во время всего полета с неработающими двигателями.  
 Б. Только во время движения вверх.  
 В. Только во время движения вниз.  
 Г. Только в момент достижения верхней точки траектории.

5. Самолет, двигаясь с постоянной скоростью  $540 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ , совершает фигуру высшего пилотажа — «петлю Нестерова» радиусом  $750 \text{ м}$ . Чему равна перегрузка летчика в верхней точке петли? ( $g \approx 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .)

- А. 2.       Б. 3.  
 В. 4.       Г. Перегрузки нет.

6. Из пружинного пистолета, установленного на высоте  $h$  над поверхностью пола классной комнаты, произвели выстрел в горизонтальном направлении. Чему равен модуль начальной скорости «снаряда», если дальность полета  $S$  (рис. 194)?

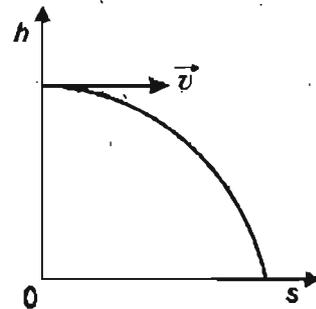


Рис. 194

- А.  $s \sqrt{\frac{2h}{g}}$        Б.  $s \sqrt{\frac{g}{2h}}$   
 В.  $\frac{s}{\sqrt{2gh}}$        Г.  $s \sqrt{2gh}$

## Вариант 2

1. На рис. 195 приведен график зависимости модуля силы упругости от деформации пружины. Чему равна жесткость пружины?

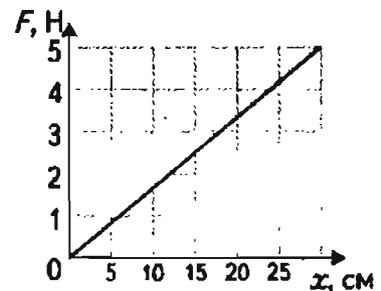


Рис. 195

- А.  $0,2 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$        Б.  $2 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$   
 В.  $20 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$        Г.  $80 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$

Пружину, жесткость которой  $k$ , разрезали на две равные части. Чему равна жесткость каждой пружины?

- А.  $\frac{k}{2}$        Б.  $k$   
 В.  $2k$        Г.  $4k$

Кабина лифта массой  $10^3$  кг начинает спуск с ускорением  $1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . Чему равно в начале спуска удлинение каната, на котором подвешен лифт, если жесткость каната  $10^8 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ ? (Ускорение свободного падения принять равным  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .)

- А.  $0,9 \cdot 10^{-2}$  м.       Б.  $10^{-2}$  м.  
 В.  $1,1 \cdot 10^{-2}$  м.       Г. Для расчета не хватает данных.

Космический корабль после выключения ракетных двигателей движется вертикально вверх, достигает верхней точки траектории и затем движется вниз. На каком участке траектории в корабле наблюдается состояние невесомости? Сопротивление воздуха пренебрежимо мало.

- А. Только во время движения вверх.  
 Б. Только во время движения вниз.  
 В. Только в момент достижения верхней

точки траектории.

- Г. Во время всего полета с неработающими двигателями.

5. Самолет, двигаясь с постоянной скоростью  $540 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ , совершает фигуру высшего пилотажа — «петлю Нестерова» радиусом 750 м. Чему равна перегрузка летчика в нижней точке петли?

( $g \approx 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ )

- А. 2.       Б. 3.  
 В. 4.       Г. Перегрузки нет.

6. Из пружинного пистолета, установленного на высоте  $h$  над поверхностью пола классной комнаты (рис. 196), произвели выстрел в горизонтальном направлении. Чему равен модуль начальной скорости «снаряда» при его подлете к полу?

- А.  $\sqrt{v_0^2 - 2gh}$ .       Б.  $v_0$ .  
 В.  $\sqrt{v_0^2 + 2gh}$ .       Г.  $v_0 + \sqrt{2gh}$ .

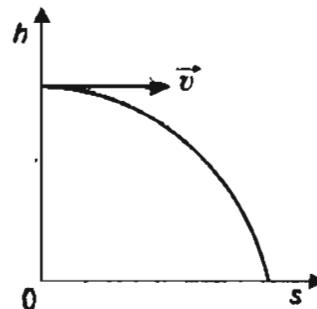


Рис. 196

## 7. СИЛЫ ТРЕНИЯ. ОБОБЩЕНИЕ: СИЛЫ В МЕХАНИКЕ (УРОВЕНЬ Б)

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

### Что такое силы трения

Силами трения называются касательные взаимодействия между соприкасающимися телами, возникающие при их относительном перемещении. Силы трения, возникающие при относительном перемещении различных тел, называются силами внешнего трения.

Опыты с движением различных соприкасающихся тел (твердых по твердым, твердых в жидкости или газе, жидких в газе и т. п.) с различным состоянием поверхностей соприкосновения показывают, что силы трения направлены против вектора относительной скорости по касательной к поверхности соприкосновения. При этом всегда происходит нагревание взаимодействующих тел.

Силы трения возникают и при относительном перемещении частей одного и того же тела.

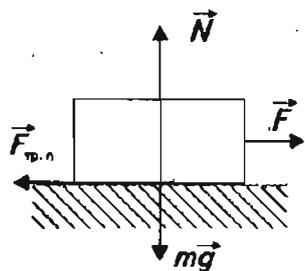
Возьмем два полых цилиндра с разными диаметрами оснований. Меньший цилиндр укрепим в центробежной машине, а больший подвесим упругой нити соосно с первым (схема 15). Придем внутренний цилиндр во вращение. Спустя известное время внешний цилиндр повернется на некоторый угол в направлении вращения внутреннего цилиндра и останется в этом положении. Причина этого явления состоит в том, что внутренний цилиндр приводит в движение слой воздуха, непосредственно прилегающий и прилипший к нему благодаря силам молекулярного сцепления.

Трение между слоями одного и того же тела (в данном случае воздуха) называется внутренним трением.

### СХЕМА 15

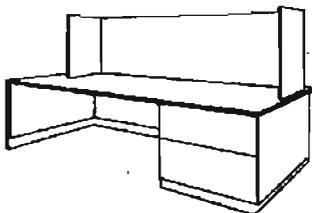
### Сила трения

Трение покоя

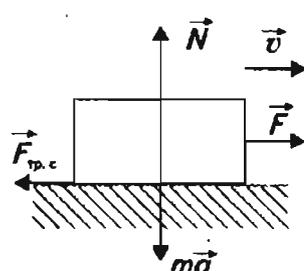


$$v = 0 \quad F = F_{\text{тр.п}}$$

$$F_{\text{тр.п(max)}} = \mu N = \mu mg$$



Трение скольжения

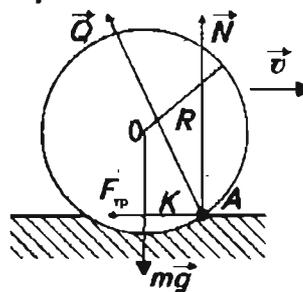


$$v \neq 0$$

$$F_{\text{тр.с}} = \mu N = \mu mg$$



Трение качения

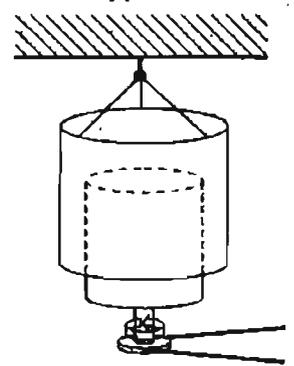


$$N = mg \quad F = mg \frac{K}{R}$$

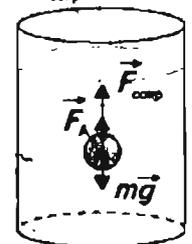
$$\frac{K}{R} \ll \mu$$



Трение в жидкостях и газе



$$\vec{F}_{\text{соп}} = -k\vec{v}$$



### Силы трения покоя и скольжения

Внешнее трение твердого тела по твердому телу называется **сухим трением**.

Различают два вида сухого трения: **трение скольжения** и **трение качения**. Первое возникает при движении груза по плоскости, оси колеса во втулке, гвоздя, вбиваемого в доску. Второе — при движении колеса автомобиля, велосипеда по поверхности Земли, шариков шарикоподшипника в оправе. (Трение качения мы рассмотрим в главе о вращательном движении твердых тел).

Максимальная сила **трения покоя** пропорциональна силе реакции  $N_{\text{н}}$ , действующей нормально к поверхностям соприкосновения тел:

$$F_{\text{макс}} = \mu N_{\text{н}} \quad (1),$$

где  $\mu$  — коэффициент трения покоя, зависящий только от свойств поверхностей соприкасающихся тел. Выражение (1) иногда называют **законом Кулона-Амонтона**.

### Жидкое трение

Трение о жидкую или газообразную среду называется **жидким или вязким трением**. Причины возникновения сил вязкого трения мы рассмотрим в главе, посвященной гидродинамике. Здесь же отметим их некоторые характерные особенности.

При вязком трении отсутствует сила трения покоя. Достаточно слегка дунуть на плавающее в ванне с водой тело, чтобы оно пришло в движение.

Характер зависимости силы жидкого трения от скорости для обычных (дозвуковых) скоростей иллюстрирует табл. 15.

Для малых скоростей:

$$F = -r_1 v \quad (2),$$

для больших скоростей:

$$F = \pm r_2 v^2 \quad (3).$$

Значения коэффициентов пропорциональности  $r_1$  и  $r_2$  зависят от свойств среды, размеров и формы тела и состояния поверхности тел. Знак в формуле (3) выбирается противоположным знаком скорости. Возрастание силы жидкого трения при увеличении скорости обуславливает существование предельной скорости, с которой тело может двигаться в сопротивляющейся среде под действием

постоянной силы. Все силы трения представлены в табл. 15.

*Практикум по решению задач*

### Примеры решения задач

#### Расчет движения тел с учетом сил трения

#### Пример 1

Длинная доска массой  $M$  лежит на гладком горизонтальном столе. На доске находится брусок массой  $m$ . Коэффициент трения между бруском и доской  $\mu$ . К бруску приложена сила, параллельная доске, зависящая от времени по закону  $F = at$ . Исследуйте зависимость проекций на горизонтальную ось ускорений бруска и доски от времени действия силы. Начертите графики этих зависимостей.

#### Решение

Относительно инерциальной системы отсчета, связанной с Землей, на брусок действуют две силы: внешняя сила  $\vec{F}$  и сила трения  $\vec{f}_1$  со стороны доски; направленная в сторону, противоположную направлению внешней силы  $\vec{F}$ . На доску действует только одна неуравновешенная сила  $\vec{f}_2$  — сила трения со стороны бруска (рис. 197, а). Силы тяжести доски и бруска уравниваются упругими силами реакции опор.

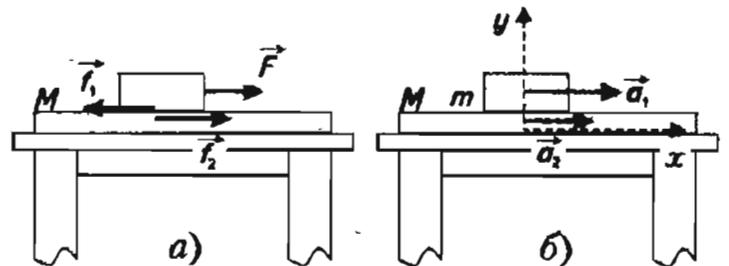


Рис. 197

Уравнения второго закона Ньютона в проекции на ось  $Ox$ , направленную параллельно вектору силы  $\vec{F}$  (рис. 197, б), можно записать в виде:

$$F_x + f_{1x} = ma_{1x}; \quad f_{2x} = Ma_{2x}.$$

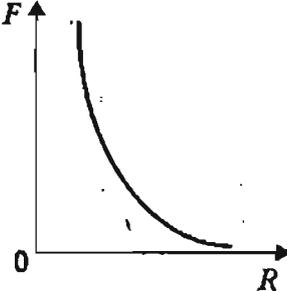
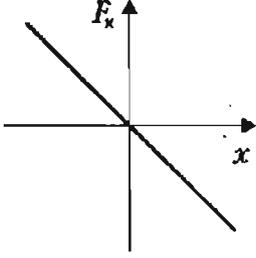
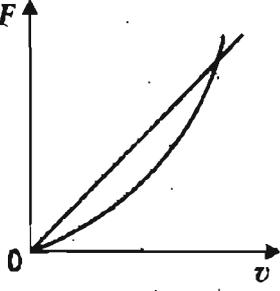
По третьему закону Ньютона:

$$\vec{f}_1 = -\vec{f}_2; \quad f_{1x} = -f; \quad f_{2x} = f.$$

Следовательно, уравнение можно записать в виде:

$$F - f = ma_{1x}; \quad f = Ma_{2x}.$$

## Силы в механике

	Сила тяготения	Сила упругости	Сила трения (сухого и жидкого)
Природа взаимодействия	Гравитационная	Электромагнитная	Электромагнитная
Формула для расчета силы	$F_T = G \frac{mM}{R^2}$	$F_x = -kx$	$F_{тр} = \mu N$ $F_{сопр} = \alpha v_{от}$ $F_{сопр} = \beta v_{от}^2$
Графическая иллюстрация			
Зависимость силы от расстояния или относительной скорости	Является функцией расстояния между взаимодействующими телами	Является функцией расстояния (зависит от деформации)	Является функцией скорости относительного движения $\vec{v}_{от}$
Зависимость силы от массы взаимодействующих тел	Прямо пропорциональна массам взаимодействующих тел	Не зависит	Не зависит
Направление вектора силы	Вдоль прямой, соединяющей взаимодействующие тела	Противоположно направлению перемещения частиц при деформации	Противоположно направлению вектора скорости $\vec{v}_{от}$
Сохранение значения силы при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую	Сохраняет, так как расстояние $R$ не изменяется	Сохраняет, так как деформация $x$ не изменяется	Сохраняет, так как модуль относительной скорости $\vec{v}_{от}$ не изменяется
Условия применимости формулы	Материальные точки или сферически симметричные шары	Достаточно малая величина деформации $x$	Формула $F_{тр} = \mu N$ выполняется приближенно, так как сила сухого трения зависит от скорости. При жидком трении до определенной скорости выполняется формула $F_{сопр} = \alpha v_{от}$ , а затем $F_{сопр} = \beta v_{от}^2$

Эти уравнения имеют смысл только при значениях  $a_{1x} \geq a_{2x}$ , так как по условию задачи доска не может двигаться быстрее бруска.

В начале движения ускорения бруска и доски равны между собой:  $a_{1x} = a_{2x}$  откуда:

$$\frac{F-f}{m} = \frac{f}{M}$$

Предельное значение силы  $F_0$ , при котором ускорения доски и бруска еще равны, можно определить из условия  $\frac{F_0-f_0}{m} = \frac{f_0}{M}$ , где  $f_0$  — максимальное значение силы трения покоя, равное силе трения скольжения:  $f_0 = \mu mg$ . Отсюда:

$$\frac{F_0 - \mu mg}{m} = \frac{\mu mg}{M}, F_0 = \mu mg \left( 1 + \frac{m}{M} \right)$$

е. при  $F \leq F_0$ :

$$a_{1x} = a_{2x} = \frac{F}{m+M}$$

Таким образом, до момента времени  $t_0$ , равного  $t_0 = \frac{F_0}{\alpha}$ :

$$t_0 = \frac{\mu mg \left( 1 + \frac{m}{M} \right)}{\alpha}$$

проекция ускорения обоих тел одинаковы и растут по линейному закону:

$$a_{1x} = a_{2x} = \frac{\alpha t}{m+M} = k_1 t,$$

где  $k_1 = \frac{\alpha}{m+M}$ .

При  $t > t_0$  проекции ускорения доски и бруска будут разными. Проекция ускорения доски, достигнув значения  $a_{2x} = \frac{\mu mg}{M}$ , останется с течением времени неизменной, в то время как проекция ускорения бруска будет увеличиваться со временем по закону:

$$a_{1x} = \frac{\alpha - \mu mg}{m} = \frac{\alpha}{m} t - \mu g = k_2 t - \mu g,$$

где  $k_2 = \frac{\alpha}{m}$ .

Графически зависимости ускорений бруска и доски от времени показаны на рис.198.

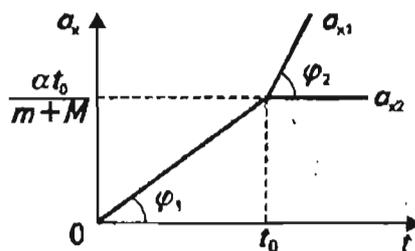


Рис. 198

Пример 2

Бруску сообщили скорость  $v = 7,6 \frac{M}{c}$ , направленную вверх по наклонной плоскости. Угол  $\alpha$  наклонной плоскости к горизонту равен  $30^\circ$ . Найдите путь, пройденный бруском за  $t = 2$  с, если коэффициент трения бруска о плоскость  $\mu = 0,3$ .

Решение

При движении бруска вверх по наклонной плоскости (рис. 199, а) модуль его ускорения равен:

$$a_1 = \frac{F + F_{тр}}{m} = \frac{mg \sin \alpha + \mu mg \cos \alpha}{m} = g(\sin \alpha + \mu \cos \alpha).$$

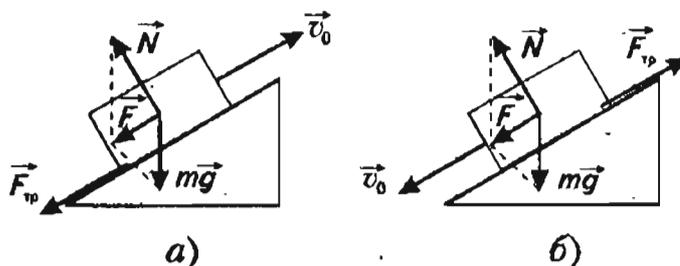


Рис. 199

Подставляя числовые данные, получим:

$$a_1 = 10 \frac{M}{c^2} \cdot (0,5 + 0,3 \cdot 0,87) \approx 7,6 \frac{M}{c^2}.$$

Время движения бруска вверх равно:

$$t_1 = \frac{v_0}{a_1}; t_1 = \frac{7,6 \frac{M}{c}}{7,6 \frac{M}{c^2}} = 1 \text{ с.}$$

Путь, пройденный за время  $t_1$ , равен:

$$s_1 = v_0 t_1 - \frac{a_1 t_1^2}{2},$$

$$s_1 = 7,6 \frac{M}{c} \cdot 1 \text{ с} - \frac{7,6 \frac{M}{c^2} \cdot 1 \text{ с}^2}{2} = 3,8 \text{ м.}$$

При движении бруска вниз по наклонной плоскости (рис. 199, б) модуль его ускорения равен:

$$a_2 = \frac{F - F_{\text{тр}}}{m} = \frac{mg \sin \alpha - \mu mg \cos \alpha}{m} = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)$$

$$a_2 = 10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot (0,5 - 0,3 \cdot 0,87) = 2,4 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}.$$

Путь, пройденный за время  $t_2 = t - t_1 = 2 - 1 = 1$  с, равен:

$$s_2 = \frac{a_2 t_2^2}{2};$$

$$s_2 = \frac{2,4 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 1 \text{ с}^2}{2} = 1,2 \text{ м}.$$

Общий путь, пройденный бруском за 2 с, будет равен:

$$s = s_1 + s_2 = 3,8 \text{ м} + 1,2 \text{ м} = 5 \text{ м}.$$

### Пример 3

По деревянным сходам, образующим угол  $\alpha$  с горизонтом, втаскивают ящик с помощью веревки (рис. 200). Под каким углом  $\varphi$  к горизонту следует тянуть веревку, чтобы с наименьшим усилием равномерно втаскивать ящик? Коэффициент трения ящика о сходы  $\mu$ .

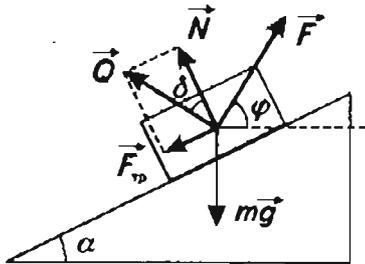


Рис. 200

### Решение

При равномерном движении ящика векторная сумма всех сил, действующих на ящик, равна нулю. Заменяем силу реакции опоры  $\vec{N}$  и силу трения  $\vec{F}_{\text{тр}}$  ( $F_{\text{тр}} = \mu N$ ) их равнодействующей  $\vec{Q}$ .

Как видно из рис. 200, угол  $\delta$  между векторами сил  $\vec{Q}$  и  $\vec{N}$  определяется из выражения:

$$\text{tg} \delta = \frac{F_{\text{тр}}}{N} = \frac{\mu N}{N} = \mu; \quad \delta = \text{arctg} \mu.$$

Силы  $m\vec{g}$ ,  $\vec{F}$  и  $\vec{Q}$  должны образовывать замкнутый треугольник. Направления сил  $m\vec{g}$  и  $\vec{Q}$  мы

знаем. Вектор  $\vec{Q}$  составляет угол с вертикалью  $(\alpha + \delta)$ .

Из конца вектора  $m\vec{g}$  под углом  $(\alpha + \delta)$  проводим прямую, вдоль которой направлена сила  $\vec{Q}$ .

Модуль вектора силы  $\vec{F}$ , соединяющего конец вектора силы  $\vec{Q}$  с началом вектора силы  $m\vec{g}$ , будет минимальным, если сила  $\vec{F}$  будет перпендикулярна к направлению действия силы  $\vec{Q}$  (рис. 201).

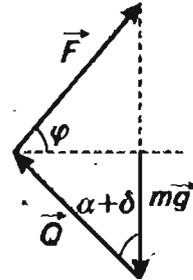


Рис. 201

Из рис. 201 ясно, что искомый угол  $\varphi$  равен углу  $\alpha + \delta$  (как углы с взаимно перпендикулярными сторонами):

$$\varphi = \alpha + \text{arctg} \mu.$$

### Пример

Сила  $\vec{F}$  действует на тело массой  $m = 0,5$  кг. На рис. 202, а представлен график зависимости проекции силы на горизонтальную ось от времени. Постройте график зависимости проекции скорости на ось  $Ox$  от времени, если сила трения скольжения  $F_{\text{тр}} = 1$  Н. Начальная скорость тела равна нулю.

### Решение

Построим вспомогательные графики зависимости проекции равнодействующей сил  $\vec{F}$  и  $\vec{F}_{\text{тр}}$  на ось  $Ox$  от времени и проекции ускорения тела на ось  $Ox$  от времени (рис. 202, б и в):

$$F_{\text{px}} = F_x - F_{\text{тр}}, \quad a = \frac{F_{\text{px}}}{m}.$$

В интервале времени  $(0-1)$  с  $v_{0x} = 0$ ;  $a_x = 0$ , следовательно:  $v_x = 0$ .

В интервале времени  $(1-2)$  с проекция ускорения тела линейно возрастает от 0 до  $2 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$ :

$$a_x = 2(t - 1).$$

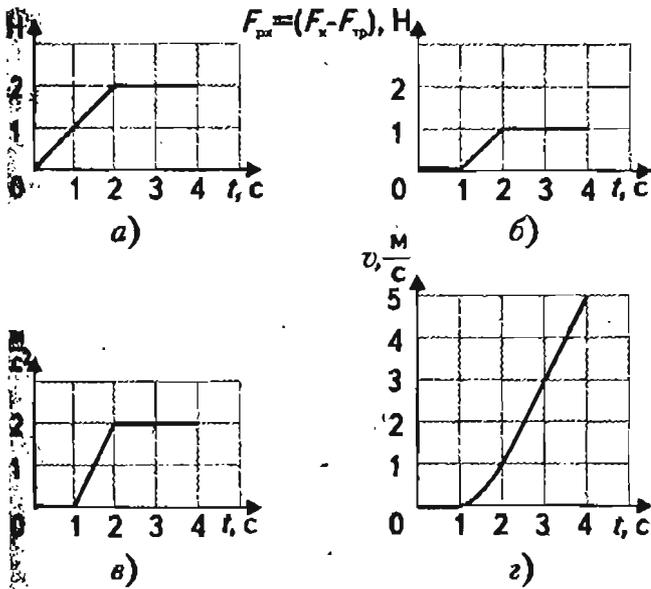


Рис. 202

Зависимость проекции скорости  $v_x$  от времени в данном интервале времени можно найти по площади под графиком ускорения, ограниченной графиком  $a_x(t)$  на участке (1–2) с и координатными осями:

$$v_x = \frac{2(t-1)(t-1)}{2} = (t-1)^2.$$

В момент времени  $t = 2$  с проекция скорости

$$v_{x2} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

В интервале времени (2–4) с ускорение  $a_x$  постоянно и равно  $2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ , следовательно, зависимость линейна:

$$v_x(t) = v_{x2} + 2(t-2).$$

Используя полученные выражения, строим график скорости для всех интервалов времени (рис. 202, г).

**Решите самостоятельно**

Мотоциклист, участвуя в аттракционе «гонки мотоциклах по вертикальной стене», разви-

л скорость  $v = 60 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ . Определите угол  $\alpha$  наклона мотоцикла к стене, если радиус закругления стены аттракциона  $R = 7$  м.

Брусок массой  $m_1 = 0,3$  кг лежит на наклонной плоскости, угол при основании которой составляет  $\alpha = 30^\circ$ . Коэффициент трения бруска о

плоскость  $\mu = 0,2$ . К бруску привязана нить, другим концом которой перекинута через неподвижный блок, к этому концу нити прикреплен груз массой  $m_2 = 0,2$  кг. Определите ускорение тел и силу упругости нити.

3. На наклонной плоскости лежит брусок. Начертите график зависимости силы трения между бруском и плоскостью от угла наклона плоскости к горизонту для  $\mu = 0,6$ .
4. На горизонтальной доске лежит груз. Коэффициент трения  $\mu$  между грузом и доской равен 0,5. С каким ускорением нужно потянуть доску, чтобы груз соскользнул с нее?
5. Два груза соединены невесомой нитью, как показано на рис. 203, и приведены в движение. Чему равна сила натяжения нити? Изменится ли эта сила, если грузы поменять местами? Коэффициент трения скольжения принять равным  $\mu = 0,1$ , а массы грузов  $m_1 = 1$  кг;  $m_2 = 2$  кг.

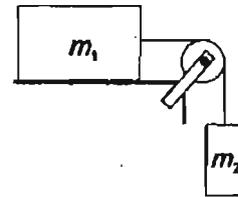


Рис. 203

*Контрольные работы*

**Вариант 1**

1. Как изменится сила трения скольжения при движении бруска по горизонтальной плоскости, если силу нормального давления увеличить в 2 раза?
  - А. Не изменится.
  - Б. Увеличится в 2 раза.
  - В. Уменьшится в 2 раза.
  - Г. Увеличится в 4 раза.
2. Брусок массой 0,2 кг равномерно тянут с помощью динамометра по горизонтальной поверхности стола. Показания динамометра 0,5 Н. Чему равен коэффициент трения скольжения? Уско-

рение свободного падения примите равным  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

- А. 0,2.                       Б. 0,25.  
 В. 0,4.                       Г. 0,5.

3. На рис. 204 представлен график зависимости модуля силы трения  $F$  от модуля силы нормального давления  $N$ . Определите коэффициент трения скольжения.

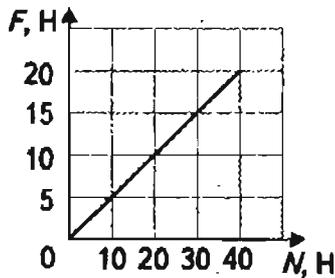


Рис. 204

- А. 0,1.                       Б. 0,2.  
 В. 0,25.                     Г. 0,5.

4. Конькобежец массой 60 кг скользит по льду. Определите силу трения скольжения, действующую на конькобежца, если коэффициент трения скольжения коньков по льду равен 0,015.

- А. 400 Н.                     Б. 40 Н.  
 В. 9 Н.                       Г. 0,9 Н.

5. Брусок массой  $m$  движется вверх по наклонной плоскости, коэффициент трения скольжения  $\mu$ . Чему равен модуль силы трения?

- А.  $\mu g$ .                       Б.  $\mu mg$ .  
 В.  $mg \sin \alpha$ .                 Г.  $\mu mg \cos \alpha$ .

6. Брусок массой  $m$  лежит на наклонной плоскости, угол наклона которой к горизонту равен  $\alpha$ . Коэффициент трения скольжения  $\mu$ . Чему равен модуль силы трения?

- А.  $mg \sin \alpha$ .                 Б.  $\mu mg$ .  
 В.  $\mu mg \cos \alpha$ .               Г.  $\mu g$ .

## Вариант 2

1. На рис. 205 представлены графики зависимости модуля силы трения  $F$  от модуля силы нор-

мального давления  $N$ . В каком случае коэффициент трения больше и во сколько раз?

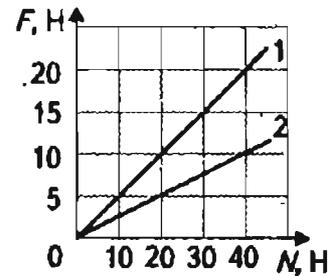


Рис. 205

- А. В первом случае;  $\mu_1 = 4\mu_2$ .  
 Б. В первом случае;  $\mu_1 = 2\mu_2$ .  
 В. Во втором случае;  $\mu_2 = 2\mu_1$ .  
 Г. Во втором случае;  $\mu_2 = 4\mu_1$ .

2. Брусок массой 0,2 кг прижат к вертикальной стене с силой 5 Н. Коэффициент трения между бруском и стеной равен 0,2. Чему равна сила трения скольжения бруска о стену?

- А. 0,4 Н.  
 Б. 0,6 Н.  
 В. 1 Н.  
 Г. 1,4 Н.

3. По условиям предыдущей задачи определите минимальную силу нормального давления на брусок, чтобы он был неподвижен. Ускорение свободного падения примите равным  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

- А. 0,5 Н.                       Б. 1 Н.  
 В. 5 Н.                         Г. 10 Н.

4. Определите тормозной путь автомобиля, начавшего торможение на горизонтальном участке шоссе с коэффициентом трения 0,5 при начальной скорости движения  $15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Ускорение свободного падения примите равным  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

- А. 90 м.                       Б. 45 м.  
 В. 22,5 м.                     Г. 11,25 м.

5. Автомобиль совершает поворот по дуге окружности. Каково минимальное значение радиуса

окружности траектории автомобиля при коэффициенте трения автомобильных шин о дорогу 0,4 и скорости автомобиля  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ? Ускорение свободного падения примите равным  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

- А. 250 м.  
 Б. 100 м.  
 В. 50 м.  
 Г. 25 м.

Брусек массой  $m$  движется по горизонтальной поверхности стола под действием силы  $F$ , направленной под углом  $\alpha$  к горизонту (рис. 206). Коэффициент трения скольжения  $\mu$ . Чему равен модуль силы трения?



Рис. 206

- А.  $F \cos \alpha$ .                       Б.  $F \sin \alpha$ .  
 В.  $\mu(mg - F \sin \alpha)$ .         Г.  $\mu(mg + F \sin \alpha)$ .

### Контрольная работа повышенного уровня сложности

#### Вариант 4

Сани съезжают со склона горы длиной  $L = 50$  м за  $t = 5$  с. Определите коэффициент трения скольжения саней о поверхность горы, если склон горы с горизонтом составляет угол  $\alpha = 30^\circ$ .

Небольшая дождевая капля падает из облака в безветренную погоду. В момент, когда ускорение капли стало равным  $a$ , ее скорость была равна  $v_1$ . Вблизи Земли капля движется с постоянной скоростью  $\bar{v}_2$ . Определите модуль этой установившейся скорости. Силу сопротивления воздуха считайте прямо пропорциональной скорости капли относительно воздуха.

Сани массой  $m = 50$  кг перемещаются по горизонтальной поверхности под действием силы

$F = 200$  Н, направленной под углом  $\alpha = 30^\circ$  к горизонту. Чему равно ускорение движения саней в момент начала движения, если коэффициент трения саней о снежный наст равен  $\mu = 0,1$ ?

#### Вариант 2

1. Тележка массой  $M = 0,5$  кг, связанная нитью с грузом массой  $m = 0,1$  кг, начинает движение с некоторым ускорением. Затем опыт повторяют, заклинив одну из осей, чтобы колеса этой оси не вращались; при этом ускорение тележки уменьшилось в  $k = 2$  раза. Чему равен коэффициент трения скольжения между колесом и дорогой? Трением качения пренебрегите.
2. Три тела массами  $m_1 = 100$  г;  $m_2 = 200$  г;  $m_3 = 300$  г связаны нитями, перекинутыми через блок, как показано на рис. 207. Коэффициент трения между горизонтальной поверхностью и телом равен  $\mu = 0,25$ . Найдите ускорение движения системы тел и силы натяжения нитей, если трением пренебречь. Массой нити и блоков пренебрегите.

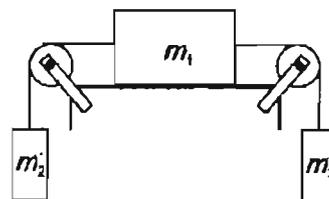


Рис. 207

3. Артист цирка массой  $m = 80$  кг стоит на доске, находящейся на боковой поверхности цилиндра. Определите предельный угол  $\alpha_0$ , который может составить с вертикалью радиус цилиндра, проведенный в точку касания доски с цилиндром, если коэффициент трения доски о цилиндр равен  $\mu = 0,2$ . Чему при этом равна сила трения? Считайте, что проскальзывания между цилиндром и полом нет.

*Творческие задания*

- А. Монета начала скользить из состояния покоя с вершины наклонной плоскости (точка А на рис. 208). Монета остановилась в точке В. До-

кажите, что коэффициент трения скольжения равен  $\mu = \frac{h}{L}$ .

- Б. Пользуясь полученными результатами, определите коэффициент трения скольжения монеты по бумажной поверхности.
- В. Сравните силы тяготения, упругости и трения по признакам, перечисленным в таблице 15 «Силы в механике».

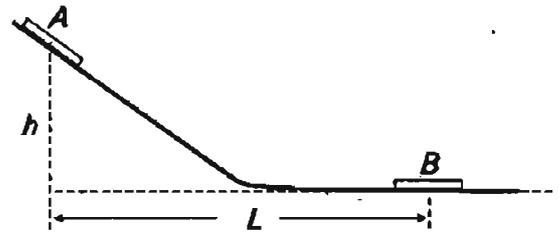


Рис. 208

## 8. УСЛОВИЯ РАВНОВЕСИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА (УРОВЕНЬ Б)

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

Равновесие твердого тела относительно инерциальной системы отсчета — это такое состояние, при котором тело может покоиться; двигаться поступательно, равномерно и прямолинейно; равномерно вращаться относительно оси, проходящей через центр масс.

Общее условие равновесия тела формулируется следующим образом: для равновесия твердого тела, находящегося под действием произвольной системы сил, необходимо, чтобы сумма проекций всех сил на оси координат и сумма моментов этих сил относительно осей координат были равны нулю.

### Проекция силы, момент силы относительно оси (уровень В)

Изобразим произвольную силу в какой-либо системе отсчета (рис. 209) и спроектируем начало и конец вектора силы на координатные плоскости  $Oxy$ ,  $Oyz$ ,  $Oxz$ . Тогда точки  $A_{xy}$ ,  $A_{yz}$ ,  $A_{xz}$  — это проекции начала, а  $B_{xy}$ ,  $B_{yz}$ ,  $B_{xz}$  — проекции конца. Если теперь эти точки спроецировать на оси  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$ , то мы получим точки  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$  и точки  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ .

Таким образом, мы получим проекции вектора силы  $\vec{F}$  на координатные плоскости ( $F_{xy}$ ,  $F_{yz}$ ,  $F_{xz}$ ) и координатные оси ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ).

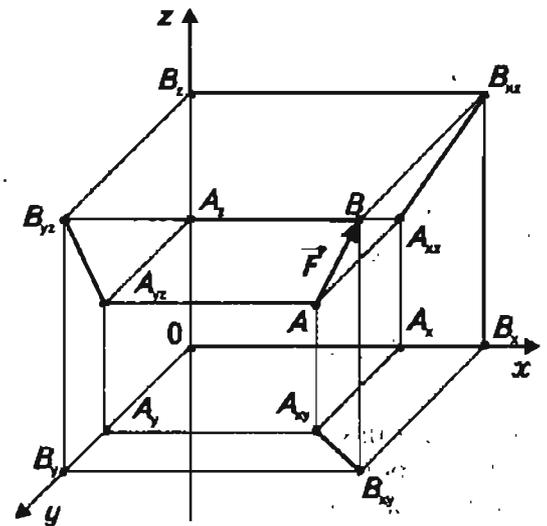


Рис. 209

Представление о проекции силы на любую координатную плоскость позволяет определить такую физическую величину как **момент силы относительно оси, перпендикулярной этой плоскости**.

Момент  $M_z$  силы  $\vec{F}$  относительно оси  $Oz$  есть произведение  $F_{xy}$  на кратчайшее расстояние  $h_1$  от точки  $O$  до прямой, проходящей через  $F_{xy}$  (рис. 210):

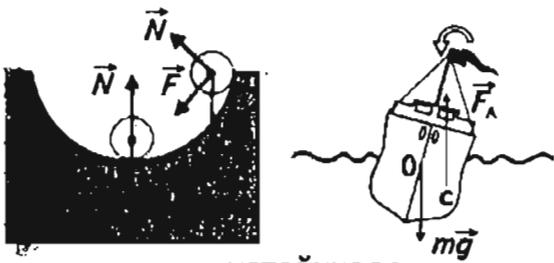
$$M_z = F_{xy} \cdot h_1.$$

Аналогично можно определить момент силы относительно других осей. Например  $M_y = F_{xz} \cdot h_2$  (рис. 211).

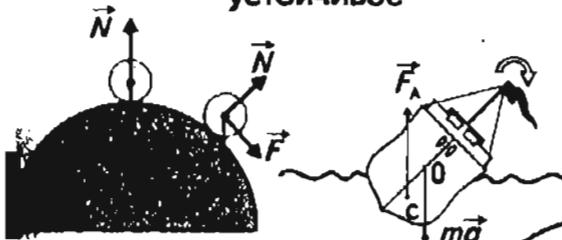
СХЕМА 16

Статика

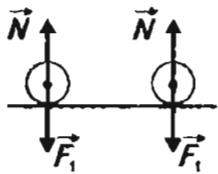
Виды равновесия



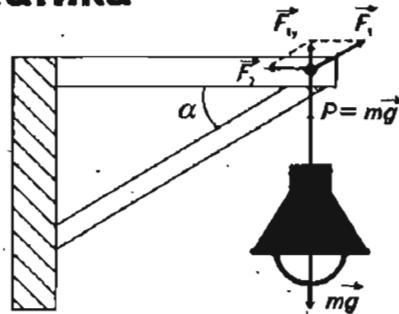
устойчивое



неустойчивое



безразличное



$$\vec{P} + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0$$

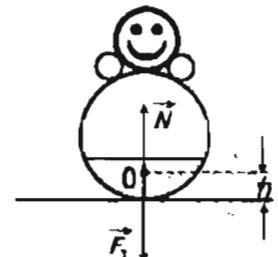
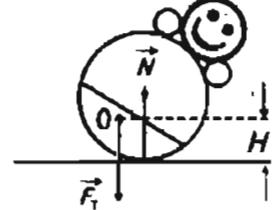
$$\sum F = 0$$

$$\sum M = 0$$



$$m_1 g d_1 + m_2 g d_2 - m_3 g d_3 = 0$$

Принцип минимальной потенциальной энергии



$$h < H$$

Перейдем к установке, представленной на схеме 210. Особенность этой установки в том, что все силы, действующие на диск, расположены в одной плоскости. Ось же вращения перпендикулярна этой плоскости. В этом случае момент силы относительно оси совпадает с моментом силы относительно центра — точки O, в которой ось пересекает плоскость.

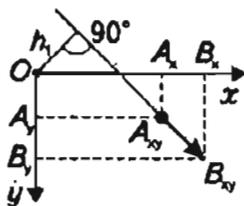


Рис. 210

Момент силы относительно центра — это вектор, модуль которого равен произведению модуля силы на кратчайшее расстояние от центра до линии действия. Это кратчайшее расстояние называется плечом силы.

Момент силы обозначается символом M; [M] = Н·м.

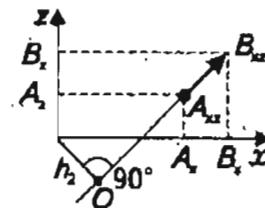


Рис. 211

### Простые случаи условий равновесия

В некоторых случаях можно ограничиться лишь применением одного условия равновесия:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots = \Sigma \vec{F} = 0.$$

Это условие равновесия позволяет определять силы, если задача сводится к равновесию материальной точки.

Часто тело имеет закрепленную ось вращения. Тогда удастся ограничиться вторым условием равновесия:

$$M_1 + M_2 + M_3 + \dots = \Sigma M = 0.$$

Оба таких случая представлены в центральной части схемы 16.

### Виды равновесия

Виды равновесия представлены в левой части схемы 16.

Если в данный момент тело находится в равновесии, то это не служит гарантией того, что оно останется в таком состоянии как угодно долго. В реальных условиях на всякое тело действуют случайные толчки, устранить которые принципиально невозможно. Чтобы выяснить, могут ли эти толчки вывести тело из состояния равновесия или нет, надо исследовать, как изменяется результирующая сил, действующих на тело при малом его отклонении от положения равновесия.

Если при малом отклонении тела от положения равновесия результирующая внешних сил не вызывает увеличения начального отклонения, то тело находится в **устойчивом равновесии**.

Если результирующая сила, возникающая при отклонении тела от положения равновесия, увеличивает начальное отклонение, равновесие тела называется **неустойчивым**.

И, наконец, если при смещении тела от положения равновесия результирующая внешних сил остается равной нулю, равновесие называется **безразличным**. В безразличном равновесии находится, например, покоящийся на гладкой горизонтальной плоскости шарик.

### Принцип минимума потенциальной энергии (уровень Б)

Состояние равновесия системы тел устойчиво только при таком условии, которое соответствует минимуму потенциальной энергии.

### Равновесие твердого тела, погруженного в жидкость

При равновесии твердого тела, погруженного в жидкость, необходимо дополнительно учитывать выталкивающую (архимедову) силу.

Модуль этой силы  $F_A$  равен произведению:

$$F_A = \rho_{ж} \cdot g \cdot V_{в.ж.}$$

где  $\rho_{ж}$  — плотность жидкости,  $V_{в.ж.}$  — объем жидкости, вытесненной телом.

Архимедова сила направлена вертикально вверх. Точка приложения выталкивающей силы совпадает с центром масс вытесненного объема жидкости. Таким образом, если в жидкость помещено неоднородное тело, то точки приложения сил тяжести и архимедовой силы не совпадают (рис. 212).

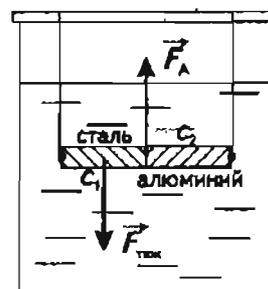


Рис. 212

При рассмотрении условия равновесия жидкости важно учитывать два обстоятельства: текучесть жидкости и закон Паскаля.

Эти факторы объясняют почему жидкость, находящаяся под действием силы тяжести, находится в равновесии, если давление во всех точках одного горизонтального уровня одинаково, а с глубиной давление жидкости изменяется в соответствии формулой:  $P = \rho_{ж} \cdot g \cdot h$ .

Если на жидкость производится внешнее давление  $P_0$ , то  $P = P_0 + \rho_{ж} \cdot g \cdot h$  (рис. 213).

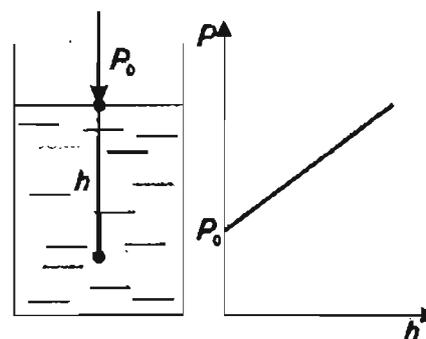


Рис. 213

*Лабораторные работы*

**Цель работы:** проверка условий равновесия диска, имеющего закрепленную ось вращения.

**Оборудование:** штатив, динамометры, набор грузов, рычаг, линейка, фанерный диск.

Соберите установку в соответствии с рис. 214 и проверьте условие равновесия диска: сумма моментов сил, действующих на диск, равна нулю. Положительными считайте моменты сил, вращающих диск по часовой стрелке, отрицательными — против часовой стрелки.

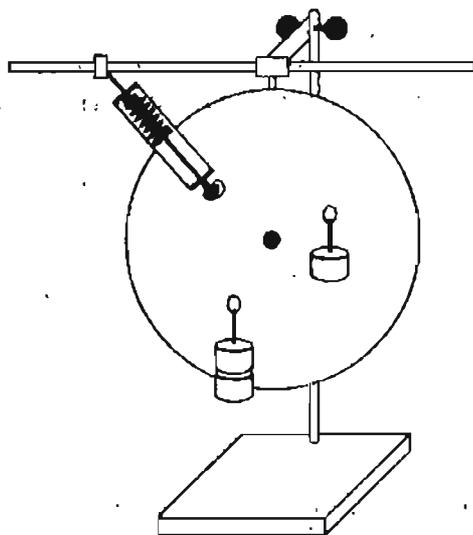


Рис. 214

*Практикум по решению задач*

**Примеры решения задач**

**Пример 1**

Два человека одинакового роста держат за концы в горизонтальном положении трубу длиной  $l = 2$  м массой  $m_1 = 10$  кг. На расстоянии  $d = 0,5$  м от одного человека к трубе подвешен груз массой  $m_2 = 100$  кг (рис. 215).



Рис. 215

Определите силы, с которыми труба давит на плечи первого и второго человека. Можно ли по данным задачи рассчитать силы давления трубы на плечи, если ее будут нести не два, а три человека?

**Решение**

В рассматриваемой задаче все силы параллельны, поэтому уравнения равновесия имеют вид:

$$\sum F_{yi} = 0; \quad \sum M_i = 0.$$

Укажем на чертеже силы, действующие на трубу, и запишем условия ее равновесия, выбрав ось, проходящую через точку  $A$ , для записи уравнения моментов сил (рис. 216):

$$N_1 + N_2 - m_1g - m_2g = 0;$$

$$m_2g|AC| + m_1g|AO| - N_2|AB| = 0.$$

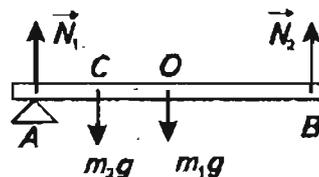


Рис. 216

Отсюда найдем:

$$N_2 = \frac{m_2g|AC| + m_1g|AO|}{|AB|};$$

$$N_2 = \frac{100 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 0,5 \text{ м} + 10 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 1 \text{ м}}{2 \text{ м}} = 300 \text{ Н}.$$

$$N_1 = (m_1 + m_2)g - N_2.$$

$$N_1 = (100 \text{ кг} + 10 \text{ кг}) \cdot 10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} - 300 \text{ Н} = 800 \text{ Н}.$$

Для проверки полученного ответа модуль силы  $N_1$  можно определить, применив правило моментов относительно точки  $B$ :

$$N_1|AB| - m_2g|CB| - m_1g|OB| = 0,$$

$$N_1 = \frac{m_2g|CB| + m_1g|OB|}{|AB|},$$

$$N_1 = \frac{100 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 1,5 \text{ м} + 10 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 1 \text{ м}}{2 \text{ м}} = 800 \text{ Н}.$$

В соответствии с третьим законом Ньютона труба давит на плечи с силами  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ , равными по мо-

дулю, но противоположно направленными силам  $\vec{N}_1$  и  $\vec{N}_2$ :

$$\vec{F}_1 = -\vec{N}_1; \vec{F}_2 = -\vec{N}_2.$$

Следовательно,  $F_1 = 800 \text{ Н}$ ,  $F_2 = 300 \text{ Н}$ .

Так как независимых уравнений для случая, когда трубу несут три человека, два, а число неизвестных сил реакций опор равно трем, то расчет всех трех сил в рамках модели «труба — опоры — абсолютно твердые тела» невыполним.

Пример 2

Груз массой  $m = 10 \text{ кг}$  висит на двух нерастяжимых тросах, составляющих между собой угол  $2\varphi = 120^\circ$  (рис. 217). Чему равны силы натяжения тросов?

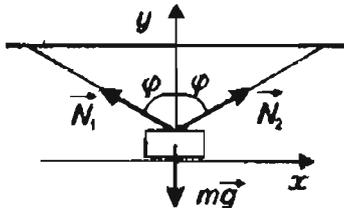


Рис. 217

Решение

Так как все три силы  $\vec{N}_1$ ,  $\vec{N}_2$ ,  $m\vec{g}$ , действующие на груз, пересекаются в одной точке, то условие равновесия определяется двумя уравнениями:

$$\begin{aligned} \sum F_{xi} = 0; \quad N_1 \sin \varphi - N_2 \sin \varphi = 0; \\ \sum F_{yi} = 0; \quad N_1 \cos \varphi + N_2 \cos \varphi - mg = 0. \end{aligned}$$

После математических преобразований получим:

$$N_1 = N_2; \quad 2N_1 \cos \varphi = mg; \quad N_1 = N_2 = \frac{mg}{2 \cos \varphi};$$

$$N_1 = N_2 = \frac{10 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{2 \cdot 0,5} = 100 \text{ Н}.$$

Пример 3

В гладком цилиндрическом стакане лежит стержень массой  $m = 0,1 \text{ кг}$  (рис. 218). Определите силы

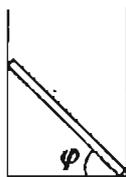


Рис. 218

реакции опор, если угол между стержнем и дном стакана равен  $\varphi = 45^\circ$ .

Решение

На стержень со стороны стакана действуют три неизвестные силы  $\vec{N}_1$ ,  $\vec{N}_2$ ,  $\vec{N}_3$  (рис. 219), следовательно, для их определения нужно использовать все возможные уравнения равновесия:

$$\sum F_{xi} = 0; \quad \sum F_{yi} = 0; \quad \sum M_{Ai} = 0.$$

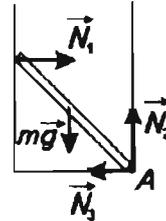


Рис. 219

Выбор оси, проходящей через точку А, определяется тем соображением, что моменты сил  $\vec{N}_1$  и  $\vec{N}_2$  относительно этой оси равны нулю. Это облегчает решение задачи:

$$N_1 - N_3 = 0; \quad N_2 - mg = 0; \quad mg \frac{l}{2} \cos \varphi - N_1 l \sin \varphi = 0,$$

где  $l$  — длина стержня.

$$N_2 = mg = 0,1 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 1 \text{ Н};$$

$$N_1 = \frac{l}{2} mg \text{ctg} \varphi; \quad N_1 = 0,5 \cdot 0,1 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 1 = 0,5 \text{ Н}.$$

Пример 4

Лестница длиной  $l$  и массой  $m$  прислонена к стене. Чему равен минимальный угол  $\varphi$  между лестницей и полом, при котором лестница еще находится в равновесии, если коэффициент трения между лестницей и стенкой равен  $\mu_1$ , а между лестницей и полом  $\mu_2$ ? Определите силы реакции опор и силы трения между лестницей, полом и стенкой.

Решение

На лестницу действуют пять сил:

$$m\vec{g}, \vec{N}_1, \vec{N}_2, \vec{F}_{\text{тр}1}, \vec{F}_{\text{тр}2} \text{ (рис. 220).}$$

Число уравнений равновесия равно трем, так как все силы лежат в одной плоскости, а число неизвестных равно пяти:  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $F_{\text{тр}1}$ ,  $F_{\text{тр}2}$ ,  $\varphi$ . Но задача решается, так как между силами трения  $\vec{F}_{\text{тр}1}$ ,  $\vec{F}_{\text{тр}2}$  и

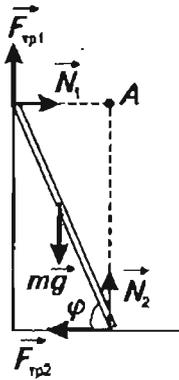


Рис. 220

силами нормального давления  $\vec{N}_1, \vec{N}_2$  существуют соотношения:

$$F_{\text{тр}1} = \mu_1 N_1; \quad F_{\text{тр}2} = \mu_2 N_2;$$

при условии предельного угла  $\varphi$ . При этом угле силы трения покоя достигают максимума, равного силам трения скольжения.

Запишем условия равновесия:

$$\begin{aligned} \sum F_x = 0; \quad N_1 - \mu_2 N_2 = 0; \\ \sum F_y = 0; \quad \mu_1 N_1 + N_2 - mg = 0; \\ \sum M_A = 0; \quad \mu_1 N_1 l \cos \varphi + \mu_2 N_2 l \sin \varphi - mg \frac{l}{2} \cos \varphi = 0. \end{aligned}$$

Решение этих трех уравнений равновесия позволяет найти все искомые параметры:

$$\begin{aligned} N_1 = \frac{\mu_2 mg}{1 + \mu_1 \mu_2}; \quad N_2 = \frac{mg}{1 + \mu_1 \mu_2}; \\ F_{\text{тр}1} = \mu_1 N_1 = \frac{\mu_1 \mu_2 mg}{1 + \mu_1 \mu_2}; \quad F_{\text{тр}2} = \mu_2 N_2 = \frac{\mu_2 mg}{1 + \mu_1 \mu_2}; \\ \operatorname{tg} \varphi = \frac{mg - 2\mu_2 N_2}{2\mu_2 N_2} = \frac{1 - \mu_1 \mu_2}{2\mu_2}; \\ \varphi = \operatorname{arctg} \frac{1 - \mu_1 \mu_2}{2\mu_2}. \end{aligned}$$

Пример 5

Груз массой  $m = 10$  кг подвешен на трех одинаковых упругих тросах. Точки подвеса тросов лежат на одной прямой, средний трос расположен вертикально, а два других составляют с ним равные углы  $\alpha = 60^\circ$  (рис. 221). Чему равны силы натяжения

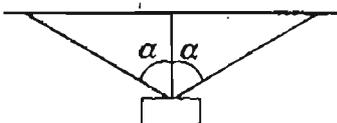


Рис. 221

тросов, если при их деформации выполняется закон Гука?

Решение

Обозначим силы, действующие на груз (рис. 222).

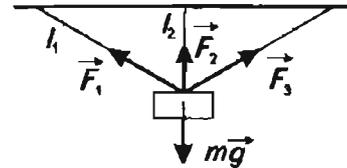


Рис. 222

Запишем условия равновесия:

$$F_1 \sin \alpha - F_3 \sin \alpha = 0 \rightarrow F_1 = F_3 \quad (1),$$

$$\begin{aligned} F_1 \cos \alpha + F_2 + F_3 \cos \alpha - mg = 0 \rightarrow \\ \rightarrow F_2 + 2F_1 \cos \alpha = mg \quad (2). \end{aligned}$$

Соотношение между длинами:  $l_2 = l_1 \cos \alpha$ .

Соотношение между удлинениями тросов  $\Delta l_1$  и  $\Delta l_2$  видно из рис. 223:

$$\Delta l_1 \approx \Delta l_2 \cos \alpha, \quad \Delta l_2 \cos \alpha \approx \Delta l_1.$$

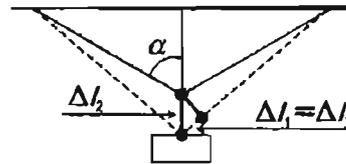


Рис. 223

Учтя, что жесткость тросов обратно пропорциональна начальной длине, получим:

$$\begin{aligned} k_1 = \frac{\alpha}{l_1}; \quad k_2 = \frac{\alpha}{l_2}. \\ F_1 = k_1 \Delta l_1 = \frac{\alpha}{l_1} \Delta l_1; \quad F_2 = k_2 \Delta l_2 = \frac{\alpha}{l_2} \Delta l_2 \rightarrow \\ \rightarrow \frac{F_1}{F_2} = \frac{\Delta l_1 l_2}{\Delta l_2 l_1} \rightarrow \frac{F_1}{F_2} = \cos^2 \alpha \quad (3). \end{aligned}$$

Из уравнений (1), (2) и (3) получим:

$$\begin{aligned} F_1 = F_3 = mg \frac{\cos^2 \alpha}{2 \cos^3 \alpha + 1} \approx 20 \text{ Н}; \\ F_2 = mg \frac{1}{2 \cos^3 \alpha + 1} \approx 80 \text{ Н}. \end{aligned}$$

Пример 6

В сосуд с квадратным дном со стороной  $a$  наливают жидкость. При какой высоте уровня жидкости сила давления жидкости на дно равна силе ее давления на боковую поверхность сосуда?

Решение.

Давление на дно сосуда равно  $P_1 = \rho gh$ , а на боковую поверхность сосуда равно:

$$P_2 = P_{cp} = \frac{P_1}{2} = \frac{1}{2} \rho gh.$$

Соответственно, сила давления на дно равна:

$$F_1 = \rho gha^2;$$

на боковую поверхность:

$$F_2 = \frac{1}{2} \rho gh \cdot ah = \frac{1}{2} \rho gah^2.$$

Из равенства сил  $F_1 = F_2$  следует:  $h = 2a$ .

### Пример 7

В цилиндрический сосуд налиты равные по массе несмешивающиеся жидкости с разными плотностями  $\rho_1$  и  $\rho_2$ . Общая высота столба жидкости в сосуде  $H$ . Чему равно гидростатическое давление на дно сосуда?

Решение

Из условий равенства масс жидкостей получим (рис. 224):

$$m_1 = m_2 \rightarrow Sh_1\rho_1 = Sh_2\rho_2 \rightarrow h_1\rho_1 = h_2\rho_2 \quad (1).$$

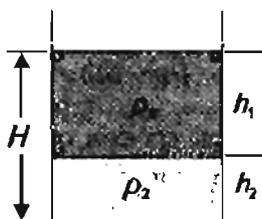


Рис. 224

По условию:  $h_1 + h_2 = H$  (2).

Решая систему уравнений (1) и (2), получим:

$$h_2 = \frac{H}{1 + \frac{\rho_1}{\rho_2}} \quad (3).$$

Искомое давление жидкостей на дно сосуда равно:

$$P = \rho_1 gh_1 + \rho_2 gh_2 = g(\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2) = 2g\rho_2 h_2.$$

С учетом выражения (3) получаем:

$$P = \frac{2g\rho_1\rho_2 H}{\rho_1 + \rho_2}.$$

### Пример 8

Груз какой массы может поднять воздушный шар объемом  $40 \text{ м}^3$ , если его наполнить водородом? Гелием? Плотность воздуха при нормальных усло-

виях  $\rho_0 = 1,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , водорода  $\rho_{\text{H}_2} = 0,09 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , гелия

$$\rho_{\text{He}} = 0,18 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Решение

Запишем условие равновесия шара (рис. 225):

$$F_A = P_{\text{газ}} + mg;$$

$$\rho_0 Vg = \rho_r Vg + mg;$$

$$m = V(\rho_0 - \rho_r).$$

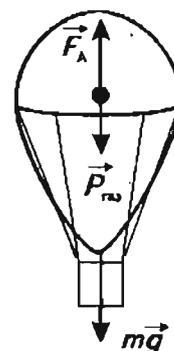


Рис. 225

Для водорода:  $m_1 = 40(1,3 - 0,09) = 48,4 \text{ кг}$ .

Для гелия:  $m_2 = 40(1,3 - 0,18) = 44,8 \text{ кг}$ .

Несмотря на то, что плотность гелия в 2 раза больше плотности водорода, разница в подъемной силе невелика.

А если учесть, что водород — газ горючий, понятно, почему воздушные шары наполняют гелием или смесью гелия и водорода.

### Решить самостоятельно

1. Однородный стержень массой  $m = 0,1 \text{ кг}$  укреплен в шарнире в точке  $O$  и удерживается в равновесии с помощью нити  $AB$  (рис. 226). Угол между стержнем и вертикальным направлением равен  $30^\circ$ . Найдите модули силы натяжения нити и реакции шарнира.
2. Однородный стержень длиной  $l = 1 \text{ м}$  и массой  $m = 0,3 \text{ кг}$  опирается о шероховатый пол и глад-

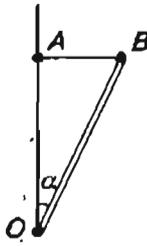


Рис. 226

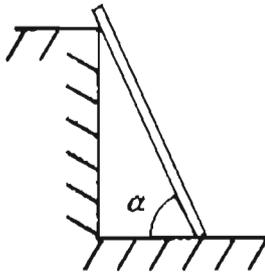


Рис. 227

кий выступ (рис. 227). Выступающий конец стержня равен 0,25 м, а угол наклона стержня к горизонту  $60^\circ$ . Найдите минимальный коэффициент трения, при котором стержень еще будет находиться в равновесии.

3. Стержень массой  $m$  удерживается с помощью нитей (рис. 228). Чему равны силы натяжения всех нитей?

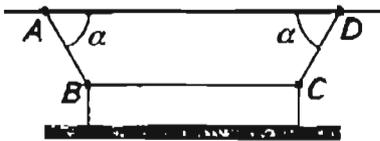


Рис. 228

4. Балка длиной  $l = 8$  м и массой  $m_1 = 100$  кг лежит на двух опорах. На расстоянии 2 м от левого конца балки подвешен груз массой  $m_2 = 40$  кг. Определите силы, с которыми, балка давит на опоры (рис. 229)

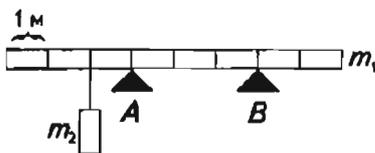


Рис. 229

5. Однородная горизонтальная балка массой  $m_1 = 100$  кг опирается на опоры A и B (рис. 230). К левому концу балки в точке O подвешен груз массой  $m_2 = 200$  кг. Найдите силы реакции опор.

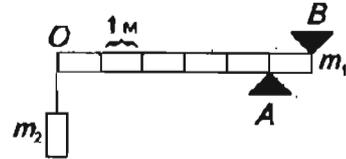


Рис. 230

6. На какой глубине в озере Байкале давление в три раза больше атмосферного?
7. В баке, наполненном керосином, имеется боковое отверстие площадью  $20 \text{ см}^2$ , центр которого находится на расстоянии 3 м от поверхности керосина. Чему равна сила гидростатического давления на пробку, закрывающую отверстие?

*Контрольные работы*

**Вариант 1**

1. На наклонной плоскости длиной 1,5 м и высотой 0,75 м лежит стальной брусок массой 500 кг. Какую силу нужно приложить параллельно наклонной плоскости, чтобы удерживать брусок в покое; равномерно поднимать вверх по наклонной плоскости? Коэффициент трения 0,2.
2. Электрическая лампа (рис. 231) подвешена на шнуре и оттянута горизонтальной оттяжкой. Определите силы натяжения шнура AB и горизонтальной оттяжки BC, если масса лампы 0,5 кг, а угол между шнуром и оттяжкой  $120^\circ$ .

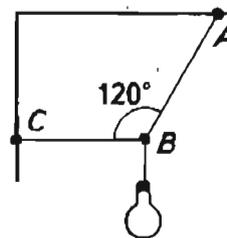


Рис. 231

3. Стальной вал длиной 2,4 м и весом 480 Н лежит на ящике, выступая за края ящика с правой стороны на 0,6 м, а с левой — на 0,8 м. Какие

силы нужно приложить, чтобы поднять вал с правой стороны и с левой стороны?

### Вариант 2

1. В ящике, длина которого 60 см, лежит шар весом 30 Н. С какой силой шар будет давить на дно и стенку ящика, если край ящика приподнят на 20 см (рис. 232)?

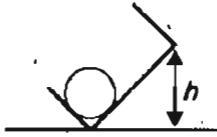


Рис. 232

2. Антенна действует на верхний конец мачты в горизонтальном направлении с силой 500 Н. Мачта укреплена оттяжкой длиной 17 м (рис. 233). Определить силы, действующие на мачту и оттяжку, если высота мачты равна 15 м.

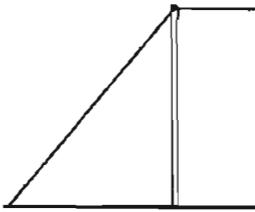


Рис. 233

3. К однородному стержню длиной 120 см, который может вращаться вокруг точки  $O$ , приложены силы  $F_1 = 2$  Н;  $F_2 = 3$  Н;  $F_3 = 4$  Н в точки  $A$ ,  $B$  и  $C$  (рис. 234). Угол между направлением силы  $F_1$  и стержнем равен  $30^\circ$ .  $OB = OC = 30$  см. Определить вес стержня  $AB$ .

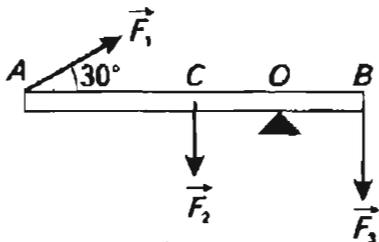


Рис. 234

### Контрольная работа повышенного уровня сложности

#### Вариант 1

1. На трех шнурах одинаковой жесткости висит неоднородная балка длиной  $l$  и массой  $m = 120$  кг, центр масс которой отстоит от первого шнура на расстояние  $\frac{l}{4}$  (рис. 235). Определите силы натяжения шнуров.

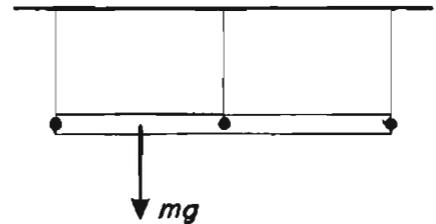


Рис. 235

2. Цилиндр радиусом  $R = 2$  см имеет цилиндрическую полость радиуса  $r = 1$  см, ось которой расположена параллельно оси цилиндра и смещена относительно нее на расстояние  $l = 1$  см. Цилиндр положили на наклонную плоскость. Найдите максимальный угол наклона плоскости, при котором цилиндр еще не скатывается.
3. Два шара массами  $m_1$  и  $m_2$  и радиусами  $R_1$  и  $R_2$  скреплены стержнем длиной  $L$  и массой  $m_3$ . На каком расстоянии от центра стержня находится центр масс системы?
4. На малый поршень гидравлического пресса давление передается с помощью рычага, плечи которого равны 5 см и 35 см. К концу длинного рычага приложена сила 100 Н. Площади поршней пресса равны  $4$  см<sup>2</sup> и  $200$  см<sup>2</sup>. Чему равна сила давления, развитая вторым поршнем?

#### Вариант 2

1. С какой минимальной силой надо прижать перпендикулярно наклонной плоскости брусок массой  $m = 1$  кг, чтобы он оставался на ней в покое, если коэффициент трения  $\mu = 0,5$ , а угол наклона плоскости  $\alpha = 45^\circ$ ?
2. Неравноплечий рычаг массой  $m_1 = 1$  кг находится в равновесии. К левому концу рычага прикреплен груз массой  $m_2 = 0,4$  кг, правый конец рычага удерживается нитью, составляющей

угол  $\alpha = 30^\circ$  с горизонтом. Найдите силу натяжения нити (рис. 236).

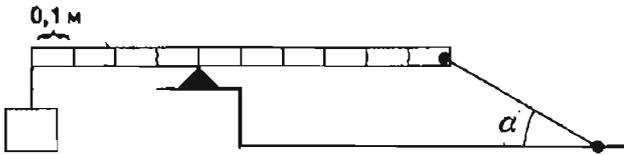


Рис. 236

3. На каком расстоянии  $x$  от центра однородной круглой пластины постоянной толщины радиуса  $R$  находится центр масс, если из нее сделаны вырезы так, как показано на рис. 237?
4. Стальной шар, имеющий внутреннюю полость, в воздухе весит  $2,6 \text{ Н}$ , а в воде  $2,2 \text{ Н}$ . Чему равен объем внутренней полости?

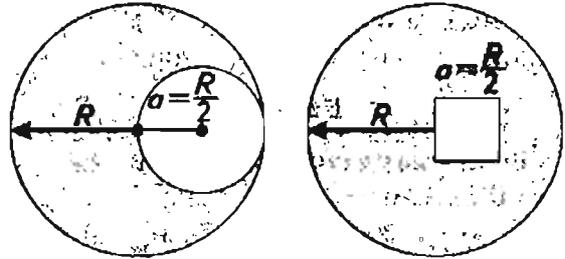


Рис. 237

*Творческие задания*

Разработайте и осуществите гидростатический способ измерения плотности вещества, из которого сделано твердое тело.

Способ основан на двух взвешиваниях тела с использованием динамометра. При первом взвешивании находят показания динамометра при подвешивании к нему тела; во второй раз — определяют показания динамометра при погружении тела в жидкость известной плотности.



# Законы сохранения в механике

## Изучив эту тему,

- вы узнаете, что в механике есть сохраняющиеся величины и два закона сохранения;
- поймете, что одну и ту же задачу можно решать с использованием законов динамики и сохранения; законы сохранения и динамики связаны друг с другом;
- научитесь анализировать явления и решать задачи с использованием законов сохранения, измерять импульс и энергию тел, определять мощность

## Основные понятия и законы:

- Импульс тела • Импульс силы • Работа • Мощность
- Энергия • Закон сохранения энергии • Закон сохранения импульса • Кинетическая энергия • Потенциальная энергия • Полная механическая энергия • Закон Бернулли

## 1. ВВЕДЕНИЕ

*Конспект.  
Таблицы. Схемы*

### Сохраняющиеся величины в физике

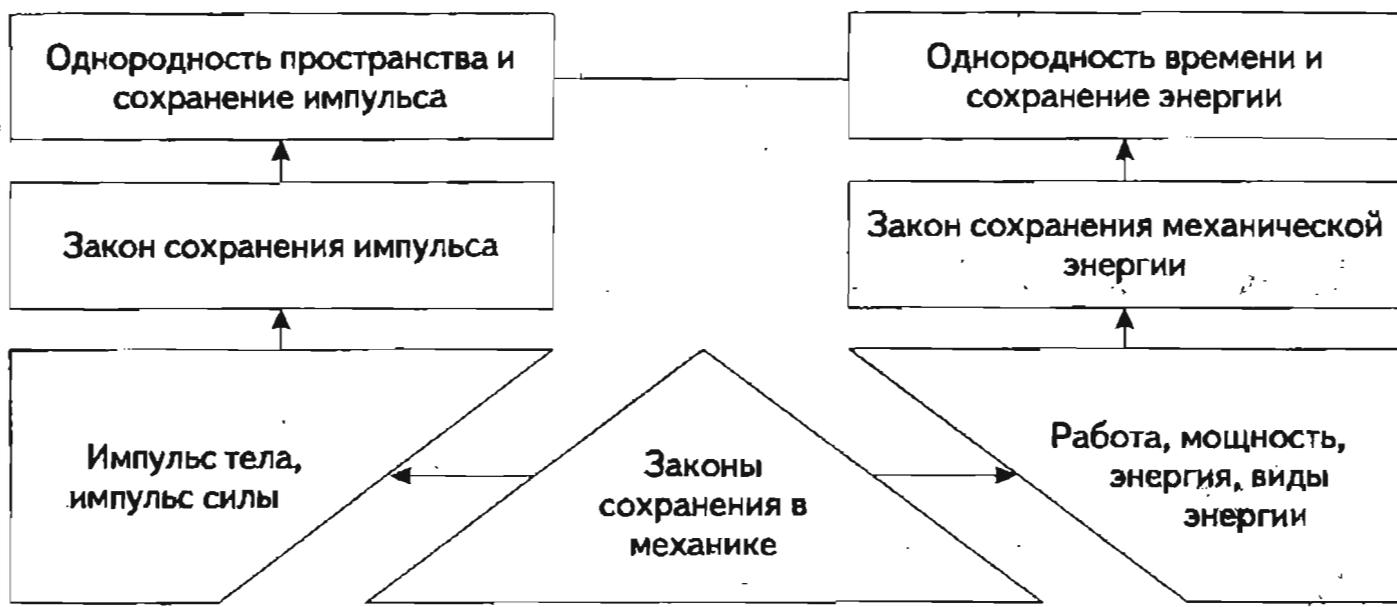
Среди огромного числа разнообразных механических величин, характеризующих тела, явления и процессы, есть три величины, которые при некоторых условиях обладают свойством сохраняться.

К таким величинам относится импульс тела  $\vec{p}$ . Импульс — это векторная физическая величина, равная  $\vec{p} = m\vec{v}$ ,  $[p] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ .

Вторая физическая величина — это механическая энергия  $E$ . Механическая энергия движущегося тела называется кинетической энергией. При поступательном движении тела его кинетическая энергия равна:  $E_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}$ .

Если тело (или его части) взаимодействует с другими телами, то взаимодействующие тела обладают потенциальной энергией. Например, потенциальная энергия тела, поднятого над Землей на высоту  $h \ll R_{\text{Земли}}$ , равна  $E_{\text{п}} = mgh$ . Энергия деформированной пружины равна  $E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$ .

**СХЕМА 17**



Свойством сохранения обладает полная механическая энергия  $E = E_{кин} + E_{п}$  невращающегося тела.

Система законов сохранения представлена в табл. 16.

**Уровень В.** Почему в природе выполняются законы сохранения? Ответ на поставленный вопрос состоит в следующем. Импульс и момент импульса сохраняются потому, что пространство однородно и изотропно (см. схему 17).

**Однородность пространства** состоит в том, что все его точки не отличаются друг от друга, они эквивалентны. Именно поэтому сохраняется импульс всех тел, составляющих замкнутую систему.

**Изотропность пространства** состоит в равноправности, эквивалентности всех направлений.

Механическая энергия замкнутой системы тел, взаимодействие между которыми описывается силами упругости и тяготения, сохраняется, потому что *время однородно*. **Однородность времени** состоит в том, что все мгновения времени, его моменты равноправны и эквивалентны.

Ученым не удалось обнаружить нарушения свойств однородности и изотропности пространства и однородности времени.

Таблица 16

**Законы сохранения в механике**

Закон сохранения	Математическая запись закона	Системы отсчета, в которых выполняется закон	Требования к внешним по отношению к системе тел силам	Внутренние силы, действующие в системе тел	Случаи нарушения законов сохранения
Закон сохранения импульса	$\sum m\vec{v} = const$ $\begin{cases} \sum mv_x = const \\ \sum mv_y = const \\ \sum mv_z = const \end{cases}$	В инерциальных	$\sum \vec{F} = 0$	Любые	Нет
Закон сохранения энергии	$E_k + E_p = const$ $\begin{cases} \frac{mv^2}{2} + mgh = const \\ \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = const \end{cases}$	В инерциальных	$\sum A = 0$	Консервативные (потенциальные) силы тяготения силы упругости	Нет

## 2. ИМПУЛЬС ТЕЛА. ИМПУЛЬС СИЛЫ

*Конспект.  
Таблицы. Схемы*

### Сила — скорость изменения импульса тела

Вспользуемся вторым законом Ньютона:  $\vec{F} = m\vec{a}$  и заменим ускорение  $\vec{a}$  на его выражение через изменение скорости:  $\frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{\Delta t}$ . Тогда получим:

$$\vec{F} = \frac{m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1}{\Delta t}$$

Векторная величина  $m\vec{v}$  называется импульсом тела  $\vec{p}$ :

$$\vec{p} = m\vec{v}, [p] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}} \text{ (рис. 238).}$$

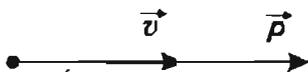


Рис. 238

Итак, мы получили иную формулировку второго закона Ньютона:

$$\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t.$$

*Изменение импульса тела  $\Delta\vec{p}$  равно импульсу силы  $\vec{F}\Delta t$ .*

Из этого закона следует, что сила, действующая на тело, равна скорости изменения его импульса:

$$\vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}.$$

Эквивалентны ли два определения силы:  $\vec{F} = m\vec{a}$  и  $\vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}$ ? Оказывается, при скоростях, значительно

меньших скорости света  $c_0 = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , динамическое измерение силы по обеим формулам даст одинаковый результат. Однако при приближении скорости тела к  $c_0$  измерение силы на основе соотношения  $\vec{F} = m\vec{a}$  не согласуется с экспериментом.

Формула же  $\vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}$  справедлива во всем интервале скоростей, вплоть до очень близких к  $c_0$ . Прав-

да, при больших скоростях импульс следует вычислять по формуле:

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}.$$

Изменение импульса  $\Delta\vec{p}$  вычисляется по формуле  $\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t$ , если на тело действует постоянная сила.

Если сила зависит от времени, то изменение импульса определяется графически. Изменение проекции импульса  $\Delta p_x$  на графике зависимости проекции силы от времени находится как площадь (рис. 239).

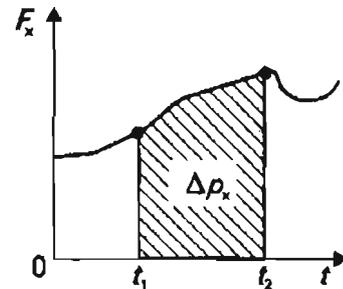


Рис. 239

При использовании соотношения  $\vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}$  следует учитывать векторный характер импульса. Из рис. 240 ясно, что  $\Delta\vec{p} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1$ .

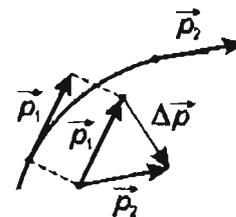


Рис. 240

*Лабораторные  
работы*

### Сравнение силы тяжести со скоростью изменения импульса свободно падающего тела

Оборудование: электромагнитный прибор для изучения движения тел.

**Возможный вариант выполнения**

Воспользовавшись прибором для изучения движения тел, определите конечную скорость тела, время его свободного падения и оцените погрешность, с которой выполняется соотношение  $mg = \frac{\Delta p}{\Delta t}$ .

**Измерение импульса тела по его тормозному пути**

Измерение импульса тела по его тормозному пути — один из основных способов измерения импульса элементарных частиц.

Воспользуйтесь результатом, полученным при выполнении творческого задания (стр. 58) и способом оценки тормозного пути (стр. 58) и оцените импульс монеты у основания наклонной плоскости.

*Практикум по решению задач*

**Примеры решения задач**

**Пример 1**

Шар массой  $m = 0,1$  кг движется со скоростью  $v_1 = 5 \frac{м}{с}$ . После удара о стенку шар движется в противоположном направлении со скоростью  $v_2 = 3 \frac{м}{с}$ .

Чему равны модули импульсов шара до и после столкновения со стенкой? Чему равен модуль изменения импульса шара? С какой средней силой стенка подействовала на шар, если время удара  $\Delta t = 0,1$  с?

**Решение**

Модуль импульса шара до столкновения со стенкой равен:

$$p_1 = m_1 v_1 = 0,5 \frac{кг \cdot м}{с}$$

Модуль импульса шара после столкновения со стенкой равен:

$$p_2 = m_2 v_2 = 0,3 \frac{кг \cdot м}{с}$$

Изменение импульса  $\Delta \vec{p}$  шара равно (рис. 241):

$$\Delta \vec{p} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1; \Delta p = p_2 + p_1 = 0,8 \frac{кг \cdot м}{с}$$

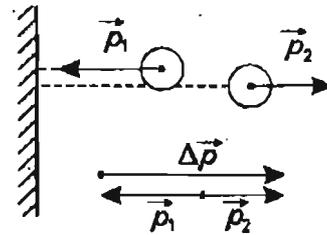


Рис. 241

Модуль средней силы действия стенки на шар равен:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = 8 \text{ Н.}$$

**Пример 2**

Шару, находящемуся на некоторой высоте над горизонтальной плоскостью, сообщили угловую скорость и пустили. Чему равен максимальный угол  $\varphi_{\max}$  между направлением шара и вертикалью сразу после отскока, если коэффициент трения скольжения между шаром и плоскостью  $\mu$ , а модуль вертикальной составляющей скорости шара после отскока не изменяется?

**Решение**

Запишем уравнение второго закона Ньютона для горизонтальной и вертикальной проекций (рис. 242):

$$N_{\text{ср}} \tau = 2m v_y;$$

$$f_{\text{тр.ср}} \tau = m v_x;$$

где  $N_{\text{ср}}$  и  $f_{\text{тр.ср}}$  — средние значения силы реакции опоры и трения при столкновении,  $\tau$  — время взаимодействия.

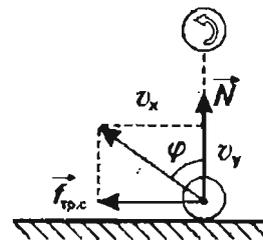


Рис. 242

Из полученных выражений следует:

$$\frac{f_{\text{тр.ср}}}{N_{\text{ср}}} = \frac{1}{2} \left( \frac{v_x}{v_y} \right) = \frac{\text{tg} \varphi}{2}$$

Учитывая, что  $f_{\text{тр.сп}} = \mu N_{\text{сп}}$  при  $\varphi_{\text{max}}$ , получим:  
 $\text{tg} \varphi = 2\mu$ ,  $\varphi = \text{arctg} 2\mu$ .

### Пример 3

Тело массой  $m = 2$  кг бросили под углом  $\alpha = 30^\circ$  к горизонту со скоростью  $v_0 = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Чему равно изменение импульса тела за время полета?

Решение, 1-й способ

Из рис. 243 видно, что изменение импульса тела равно:

$$\Delta \vec{p} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1.$$

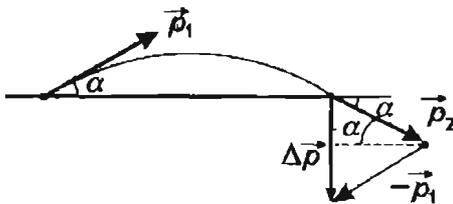


Рис. 243

Модуль  $\Delta p$  равен:

$$\Delta p = p_2 \sin \alpha + p_1 \sin \alpha.$$

Так как  $p_1 = p_2 = mv_0$ , то:

$$\Delta p = 2mv_0 \sin \alpha = 20 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

Вектор  $\Delta \vec{p}$  направлен вертикально вниз.

Решение, 2-й способ

Из второго закона Ньютона следует, что  $\Delta \vec{p} = \vec{F} \Delta t$ .

Сила во время всего полета равна:  $\vec{F} = m\vec{g}$ . Следовательно, вектор  $\Delta \vec{p}$  направлен вертикально вниз.

Так как  $\Delta t = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$ , то модуль:

$$\Delta p = \frac{mg2v_0 \sin \alpha}{g} = 2mv_0 \sin \alpha; \Delta p = 20 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

### Решить самостоятельно

1. Движение тела массой 2 кг описывается уравнением:  $x = 2 - 4t + 2t^2$ . Чему равен импульс этого тела через 3 с? Через 5 с?
2. Тело массой 2 кг равномерно движется по окружности со скоростью  $5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Чему равен модуль изменения импульса за время, равное четверти

периода? Половине периода? Полному периоду обращения тела?

3. На рис. 244 представлен график зависимости модуля равнодействующей всех сил, действующих на тело, от времени. Чему равен модуль изменения импульса тела за 3 с?

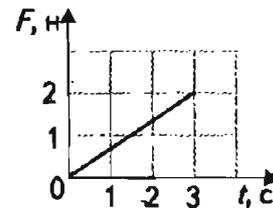


Рис. 244

4. Камень массой 2 кг начинает падать с высоты  $h = 5$  м. Чему равно изменение импульса камня за время падения?

Контрольные  
работы

### Вариант 1

1. Каким выражением определяют импульс тела?
 

<input type="checkbox"/> А) $m\vec{a}$ .	<input type="checkbox"/> Б) $m\vec{v}$ .
<input type="checkbox"/> В) $\vec{F}t$ .	<input type="checkbox"/> Г) $\frac{mv^2}{2}$ .
2. В каких единицах измеряется импульс в Международной системе?
 

<input type="checkbox"/> А) 1 Н.	<input type="checkbox"/> Б) 1 кг.
<input type="checkbox"/> В) 1 Нс.	<input type="checkbox"/> Г) 1 Дж.
3. Чему равно изменение импульса тела, если на него подействовала сила 15 Н в течение 5 секунд?
 

<input type="checkbox"/> А) $3 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ .	<input type="checkbox"/> Б) $5 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ .
<input type="checkbox"/> В) $15 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ .	<input type="checkbox"/> Г) $75 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ .
4. Тело массой  $m$  движется со скоростью  $\vec{v}$ . После взаимодействия со стенкой тело стало двигаться в противоположном направлении с той же по модулю скоростью. Чему равен модуль изменения импульса тела?
 

<input type="checkbox"/> А) 0.	<input type="checkbox"/> Б) $mv$ .
--------------------------------	------------------------------------

- В)  $2mv$ .       Г)  $4mv$ .

5. Два автомобиля с одинаковыми массами  $m$  движутся со скоростями  $v$  и  $3v$  относительно Земли в противоположных направлениях. Чему равен импульс второго автомобиля в системе отсчета, связанной с первым автомобилем?

- А)  $mv$ .       Б)  $2mv$ .  
 В)  $3mv$ .       Г)  $4mv$ .

6. На рис. 245 представлен график зависимости модуля силы  $F$ , действующей на тело, от времени. Чему равно изменение скорости тела массой 2 кг за 4 с?

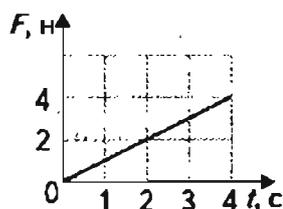


Рис. 245

- А)  $4 \frac{м}{с}$ .       Б)  $8 \frac{м}{с}$ .  
 В)  $16 \frac{м}{с}$ .       Г)  $32 \frac{м}{с}$ .

**Вариант 2**

Чему равен импульс тела массой 2 кг, движущегося со скоростью  $3 \frac{м}{с}$ ?

- А)  $1,5 \frac{кг \cdot м}{с}$ .       Б)  $6 \frac{кг \cdot м}{с}$ .  
 В)  $9 \frac{кг \cdot м}{с}$ .       Г)  $18 \frac{кг \cdot м}{с}$ .

Каково наименование единицы импульса, выраженное через основные единицы Международной системы?

- А) 1кг.       Б)  $1 \frac{кгм}{с}$ .  
 В)  $1 \frac{кгм}{с^2}$ .       Г)  $1 \frac{кгм^2}{с^2}$ .

3. Какое выражение определяет изменение импульса тела?

- А)  $m\bar{a}$ .       Б)  $m\bar{v}$ .  
 В)  $\bar{F}t$ .       Г)  $\frac{mv^2}{2}$ .

4. Тело массой 2 кг движется со скоростью  $3 \frac{м}{с}$ . После взаимодействия со стенкой тело стало двигаться в противоположном направлении со скоростью  $2 \frac{м}{с}$ . Чему равен модуль изменения импульса тела?

- А)  $2 \frac{кг \cdot м}{с}$ .       Б)  $4 \frac{кг \cdot м}{с}$ .  
 В)  $6 \frac{кг \cdot м}{с}$ .       Г)  $10 \frac{кг \cdot м}{с}$ .

5. Два автомобиля с одинаковыми массами  $m$  движутся со скоростями  $v$  и  $3v$  относительно Земли в одном направлении. Чему равен импульс второго автомобиля в системе отсчета, связанной с первым автомобилем?

- А)  $mv$ .       Б)  $2mv$ .  
 В)  $3mv$ .       Г)  $4mv$ .

6. На рис. 246 представлен график зависимости модуля силы  $F$ , действующей на тело, от времени. Чему равно изменение скорости тела массой 2 кг за 3 с?

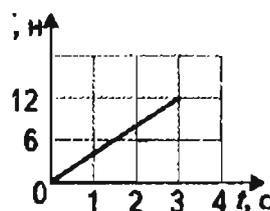


Рис. 246

- А)  $9 \frac{м}{с}$ .       Б)  $12 \frac{м}{с}$ .  
 В)  $18 \frac{м}{с}$ .       Г)  $36 \frac{м}{с}$ .

### 3. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

Закон сохранения импульса замкнутой системы тел в инерциальной системе отсчета может быть сформулирован следующим образом.

*Независимо от природы сил взаимодействия полный импульс тел, составляющих замкнутую систему, является постоянным.*

**Замкнутой** называется система тел, для которой сумма всех внешних сил равна нулю.

**Внутренние силы системы тел** — это силы взаимодействия тел между собой. Все другие силы, действующие на тела системы — **внешние силы**.

**Полный импульс системы тел** — это векторная сумма импульсов всех тел, входящих в замкнутую систему.

Рассмотрим как пример взаимодействие при столкновении двух свободно падающих тел (рис. 247, а).

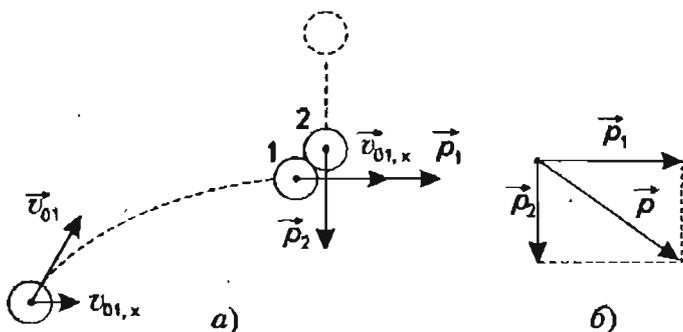


Рис. 247

Общий импульс двух тел равен  $\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$ . Вектор  $\vec{p}_1$  направлен горизонтально, вектор  $\vec{p}_2$  — вертикально вниз.

Модуль  $p = \sqrt{p_1^2 + p_2^2}$  (рис. 247, б).

Система из двух взаимодействующих тел в данном примере не является замкнутой. Кроме сил взаимодействия между телами ( $\vec{F}_{12}$  и  $\vec{F}_{21}$ ), на каждое тело действует внешняя сила — сила тяжести. Сумма изменений их импульсов не равна нулю.

Другие примеры систем представлены на схеме 17.

**Уровень В.** В механике закон сохранения импульса является следствием законов Ньютона. Покажем это на примере, рассмотренном выше.

Изменение импульса первого тела при взаимодействии со вторым равно:  $\Delta\vec{p}_1 = (\vec{F}_{21} + m_1\vec{g})\Delta t$ . Изменение импульса второго тела равно:  $\Delta\vec{p}_2 = (\vec{F}_{12} + m_2\vec{g})\Delta t$  (рис. 248).

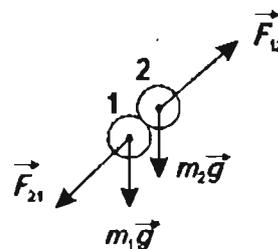


Рис. 248

Найдем изменение импульса взаимодействующих тел:

$$\begin{aligned} \Delta\vec{p}_1 + \Delta\vec{p}_2 &= \vec{F}_{21}\Delta t + m_1\vec{g}\Delta t + \vec{F}_{12}\Delta t + m_2\vec{g}\Delta t = \\ &= (\vec{F}_{21} + \vec{F}_{12})\Delta t + (m_1\vec{g} + m_2\vec{g})\Delta t. \end{aligned}$$

Сумма  $(\vec{F}_{12} + \vec{F}_{21})$  равна нулю, так как, в соответствии с третьим законом Ньютона  $\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$ .

Итак, изменение импульса  $(\Delta\vec{p}_1 + \Delta\vec{p}_2)$  системы взаимодействующих тел равно импульсу внешних сил.

Если система замкнута, сумма внешних сил равна нулю и изменение импульса равно нулю:

$$\Delta\vec{p}_1 + \Delta\vec{p}_2 = 0.$$

Импульс каждого тела изменился, однако общий импульс системы остается неизменным:

$$(\vec{p}'_1 - \vec{p}_1) + (\vec{p}'_2 - \vec{p}_2) = 0.$$

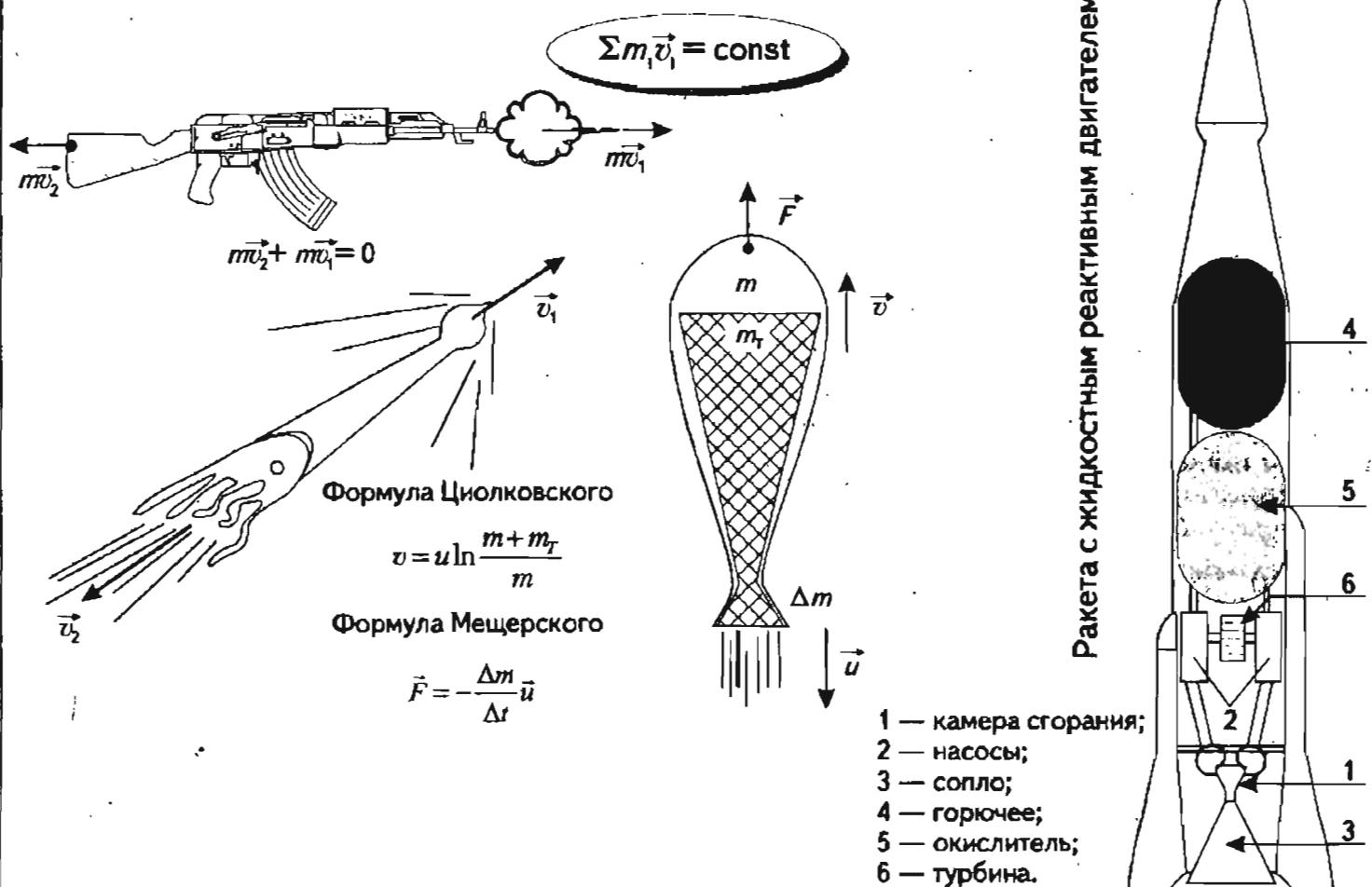
Иногда закон сохранения импульса применяется и для незамкнутых систем. Вам при решении задач могут встретиться два таких случая.

Первый случай — разнообразные «взрывы», при которых время взаимодействия  $\Delta t$  очень мало, и тогда импульс внешних сил  $\vec{F}\Delta t$  также мал.

Второй случай — это тогда, когда внешние силы направлены вдоль одной прямой. Именно этот случай и рассмотрен в предыдущем примере: сила тя-

**СХЕМА 18**

**Закон сохранения импульса**



жести направлена вертикально. Следовательно, изменяется лишь вертикальная составляющая общего импульса системы, однако его горизонтальная составляющая сохраняется.

Границы применимости закона сохранения импульса значительно шире, чем законов Ньютона, из которых он следует в механике. Это объясняется тем, что закон сохранения импульса следует из фундаментального свойства пространства — его однородности.

Закон сохранения импульса используется во всем интервале скоростей движения тел, вплоть до ско-

рости света  $c_0 = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$ . Он выполняется и при взаимодействии космических объектов, и при взаимодействии элементарных частиц. Следует только учесть, что закон сохранения импульса выполняется в инерциальных системах отсчета.

На схеме 18 приведены разнообразные примеры явлений, которые могут быть объяснены на основе закона сохранения импульса. Одно из таких явлений — отдача. До взаимодействия ружья и пули их суммарный импульс равен нулю. Таким же он должен остаться и после вылета пули. Следовательно, ружье должно приобрести точно такой же

по модулю, но противоположно направленный импульс.

Реактивное движение — это единственный способ ускоренного перемещения в космическом пространстве. Импульс ракеты с топливом до старта равен нулю. Таким же он должен остаться и после старта. Именно это обстоятельство объясняет движение корпуса ракеты в сторону, противоположную движению продуктов горения топлива.

*Лабораторные  
работы*

### Уровень Б

Цель работы: исследование взаимодействия «частиц» на основе закона сохранения импульса.

В данной работе моделями частиц являются монеты. На этой простой модели можно наблюдать многие особенности столкновений, которые встречаются и при взаимодействии больших (макроскопических) тел, и элементарных частиц.

**Оборудование:** эксперимент проводится на оборудовании, уже использованном в предыдущих работах.

Выполняя соответствующие работы, вы уже научились измерять скорость монеты у основания наклонной плоскости, ее импульс. Теперь вы готовы исследовать столкновения монет.

#### Порядок выполнения работы

1. Положите на наклонную плоскость полосу бумаги так, чтобы часть ее длиной 25–30 см находилась на горизонтальной поверхности стола.

Монета, уложенная на поверхность бумажной полосы на наклонной плоскости, должна плавно соскальзывать по ней и двигаться по горизонтальной поверхности до остановки. Подберите такие угол наклона плоскости и начальное положение запуска монеты, чтобы путь монеты на горизонтальной поверхности составлял 15–25 см.

2. Отметьте начальное положение монеты на наклонной плоскости и ее конечное положение на горизонтальной плоскости. Проведите на горизонтально расположенном участке бумажной полосы прямую, по которой двигался центр диска монеты. Отметьте положение центра монеты в начале горизонтального участка пути (точка  $A$ ) и в его конце (точка  $B$ ). Измерьте тормозной путь  $s = AB$  (рис. 249).

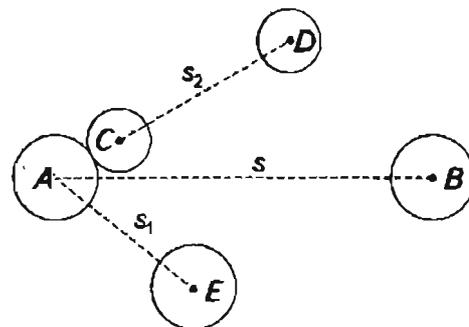


Рис. 249

3. Поставьте на пути движения первой монеты достоинством 5 коп. вторую монету достоинством 3 коп., таким образом, чтобы столкновение произошло в тот момент, когда центр диска первой монеты проходит через точку  $A$ . Удар должен быть нецентральный, т. е. центр диска второй монеты должен быть расположен на некотором расстоянии от прямой  $AB$ , по которой движется центр диска первой монеты. Отметьте начальное положение центра диска второй монеты (точка  $C$  на рис. 249). Запустите первую монету с того же места на наклонной плоскости, как и в первом опыте. Отметьте конечное положение центров дисков первой (точка  $E$ ) и второй (точка  $D$ ) монет (рис. 250). Соедините точки  $A$  и  $E$  отрезком  $AE$ , точки  $C$  и  $D$  отрезком  $CD$ . Измерьте расстояния  $s_1$  и  $s_2$ .

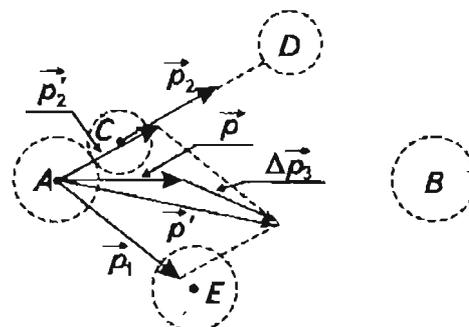


Рис. 250

4. Положите монету на наклонную плоскость с бумажной полосой и постепенно увеличивайте угол наклона до тех пор, пока монета не начнет скользить по бумаге. Измерьте длины катетов  $h$  и  $b$ , вычислите тангенс угла предельного наклона ( $\operatorname{tg} \varphi = \frac{h}{b}$ ), равный коэффициенту трения:

$$\mu = \operatorname{tg} \varphi = \frac{h}{b}.$$

5. По известным значениям масс (см. табл. 4) монет, тормозных путей  $s$ ,  $s_1$  и  $s_2$  и коэффициента трения  $\mu$  вычислите значения скоростей монет  $v$ ,  $v_1$  и  $v_2$  и модулей  $p$ ,  $p_1$  и  $p_2$  их импульсов.
6. Отложите на прямых, проходящих через точки  $A$  и  $B$ ,  $A$  и  $E$ ,  $C$  и  $D$ , отрезки, пропорциональные модулям импульсов монет. Постройте векторы  $\vec{p}$ ,  $\vec{p}_1$  и  $\vec{p}_2$  (рис. 250). Проверьте, выполняется ли условие  $\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$ .
7. Постройте вектор  $\vec{p}' = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$ , перенеся начало вектора  $\vec{p}_2$  в точку  $A$ . Найдите разность векторов  $\Delta\vec{p}_3 = \vec{p}' - \vec{p}$ . Измерьте длину вектора  $\Delta\vec{p}_3$  и по известному масштабу построения векторов импульса определите значение модуля вектора  $\Delta\vec{p}_3$ .
8. Определите границу погрешностей значений импульсов системы из двух монет до и после столкновения. Проверьте, лежит ли обнаруженное различие импульсов  $\Delta\vec{p}_3$  в пределах границ погрешностей измерений. Результаты измерений и вычислений занесите в отчетную таблицу.

Показатель	Единица измерения	Результаты измерений		
		1	2	3
$s$	м			
$s_1$	м			
$s_2$	м			
$h$	см			
$b$	см			
$p$	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$			
$p_1$	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$			
$p_2$	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$			
$p'$	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$			
$\Delta p_3$	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$			
$\mu$				
$\varepsilon_p$				
$\Delta p_4$	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$			

### Примеры решения задач

#### Пример 1

Мальчик массой  $m_1 = 50$  кг движется к носу лодки массой  $m_2 = 150$  кг со скоростью  $u = 0,6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  относительно нее. С какими скоростями движутся при этом лодка и мальчик относительно воды? Сопротивлением воды пренебрегите.

#### Решение

Поскольку равнодействующая сил тяжести и архимедовой силы, действующих на лодку, равна нулю, система тел «лодка— мальчик» является замкнутой. Силой сопротивления воды, возникающей при движении лодки, пренебрежем, так как при малых скоростях эта сила мала. Применим для этой системы тел закон сохранения импульса относительно системы отсчета, связанной с неподвижной водой. Импульс системы до начала движения мальчика равен нулю.

За положительное направление оси  $Ox$  выберем направление движения лодки (рис. 251). Относитель-

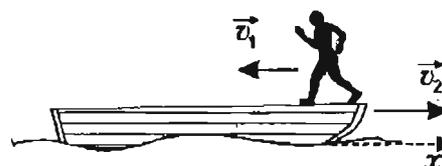


Рис. 251

но воды проекция импульса лодки на ось  $Ox$  равна  $m_2 v_2$ , а импульса мальчика —  $m_1 v_1$ , где  $v_1$  и  $v_2$  — соответственно скорости мальчика и лодки относительно воды. Из закона сложения скоростей следует, что  $v_1 = u - v_2$ . Запишем теперь закон сохранения импульса:

$$0 = m_2 v_2 - m_1 (u - v_2).$$

Отсюда скорости лодки и мальчика относительно воды равны:

$$v_2 = \frac{m_1 u}{m_1 + m_2};$$

$$v_2 = \frac{50 \text{ кг} \cdot 0,6 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{50 \text{ кг} + 150 \text{ кг}} = 0,15 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$v_1 = u - v_2 = u - \frac{m_1 u}{m_1 + m_2} = \frac{m_2 u}{m_1 + m_2};$$

$$v_1 = \frac{150 \text{ кг} \cdot 0,6 \frac{\text{М}}{\text{с}}}{50 \text{ кг} + 150 \text{ кг}} = 0,45 \frac{\text{М}}{\text{с}}.$$

Эту задачу можно решить, применив закон сохранения импульса в векторном виде:

$$m_2 \vec{v}_2 + m_1 (\vec{u} + \vec{v}_2) = 0;$$

$$\vec{v}_2 = -\frac{m_1 \vec{u}}{m_1 + m_2};$$

$$\vec{v}_1 = \vec{u} + \vec{v}_2 = \vec{u} - \frac{m_1 \vec{u}}{m_1 + m_2} = \frac{m_2 \vec{u}}{m_1 + m_2}.$$

Из полученных выражений ясно, что вектор  $\vec{v}_2$  противоположно направлен вектору  $\vec{u}$ , а вектор  $\vec{v}_1$  сонаправлен с ним.

### Пример 2

Орудие, не имеющее противооткатного устройства, стреляет снарядом под углом  $\alpha = 60^\circ$  к горизонту. Масса снаряда  $m_1 = 10$  кг, его начальная скорость

$v_1 = 500 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ . Какова скорость отката орудия, если его масса  $m_2 = 500$  кг?

### Решение

В момент выстрела сумма внешних сил, действующих на орудие, не равна нулю, поэтому импульс системы тел «орудие—снаряд» не сохраняется: до выстрела он был равен нулю, а после него — векторной сумме  $m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2$  (рис. 252). Однако для го-

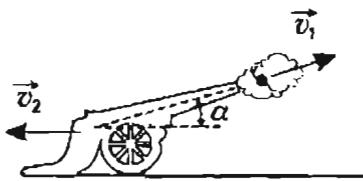


Рис. 252

ризонтального направления, вдоль которого на систему не действуют внешние силы, может быть применен закон сохранения импульса.

Выбрав за положительное направление оси  $Ox$  направление скорости отката орудия, запишем закон сохранения импульса:

$$0 = m_2 v_2 - m_1 v_1 \cos \alpha.$$

Тогда:

$$v_2 = \frac{m_1 v_1 \cos \alpha}{m_2};$$

$$v_2 = \frac{10 \text{ кг} \cdot 500 \frac{\text{М}}{\text{с}} \cdot 0,5}{500 \text{ кг}} = 5 \frac{\text{М}}{\text{с}}.$$

### Пример 3

Граната массой  $m_0 = 3$  кг летела в горизонтальном направлении со скоростью  $v_0 = 10 \frac{\text{М}}{\text{с}}$  и разорвалась на три осколка. Направление вектора скорости осколка с массой  $m_1 = 0,5$  кг противоположно первоначальному направлению полета гранаты, а модуль его равен  $20 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ . Второй осколок массой  $m_2 = 1$  кг летит со скоростью, модуль которой равен  $v_2 = 30 \frac{\text{М}}{\text{с}}$  под углом  $\alpha = 30^\circ$  к первоначальному направлению движения гранаты. Оцените скорость третьего осколка.

### Решение

В момент разрыва на гранату действуют внутренние силы, много большие, чем внешняя сила тяжести. Поэтому за малое время разрыва гранаты изменением импульса системы осколков можно пренебречь и воспользоваться законом сохранения импульса.

На рис. 253 в масштабе отложен вектор импульса  $\vec{p}_0$  гранаты до ее разрыва:

$$p_0 = m_0 v_0 = 30 \left( \frac{\text{кг} \cdot \text{М}}{\text{с}} \right).$$

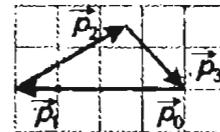


Рис. 253

Векторная сумма импульсов осколков:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3$$

должна быть равна вектору  $\vec{p}_0$ , причем:

$$p_1 = m_1 v_1 = 10 \left( \frac{\text{кг} \cdot \text{М}}{\text{с}} \right), \text{ а } p_2 = m_2 v_2 = 30 \left( \frac{\text{кг} \cdot \text{М}}{\text{с}} \right).$$

Искомый вектор третьего осколка  $\vec{p}_3$  соединяет концы векторов  $\vec{p}_2$  и  $\vec{p}_0$ .

Приближенное значение модуля и направление  $\vec{p}_3$  можно найти из получившегося векторного треугольника:

$$p_3 \approx 20 \left( \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}} \right), \beta \approx 50^\circ.$$

Откуда следует:

$$v_3 = \frac{p_3}{m_0 - m_1 - m_2} = \frac{20 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}}{1,5 \text{ кг}} \approx 13,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

**Пример 4**

Чему равна реактивная сила тяги, действующая на ракету, из сопла которой ежесекундно выбрасывается  $\Delta m = 7,5 \cdot 10^3$  кг горючих газов с постоянной скоростью относительно ракеты  $u = 4 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Действием внешних сил пренебречь.

**Решение**

Так как система «ракета — топливо» замкнутая, то в соответствии с законом сохранения импульса запишем:  $m\Delta\vec{v} + \Delta m\vec{u} = 0$ , где  $m$  — масса ракеты. Поделив обе части равенства на интервал времени  $\Delta t$ , получим:

$$m \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = -\frac{\Delta m}{\Delta t} \vec{u} \rightarrow \vec{F}_{\text{реакт}} = -\frac{\Delta m}{\Delta t} \vec{u} \text{ (формула Мещерского, схема 17).}$$

Подставив численные данные, получим:

$$F_{\text{реакт}} = 3 \cdot 10^7 \text{ Н.}$$

**Пример 5**

На легкоподвижной тележке массой  $M$  находятся два школьника, массой  $m$  каждый. Чему равна скорость  $v$  тележки после того как:

- а) школьники спрыгнули с тележки одновременно;
- б) школьники спрыгнули с тележки один за другим?

Скорость школьника относительно тележки  $u$ . В каком случае скорость тележки больше?

**Решение**

Трением в условиях данной задачи можно пренебречь, поэтому систему тел «тележка — школьники» можно считать замкнутой.

а) Запишем закон сохранения импульса для первого случая:

$$0 = Mv - 2m(v - u) \rightarrow v = \frac{2mu}{M + 2m}.$$

б) Запишем закон сохранения импульса для случая прыжка первого школьника:

$$0 = (M + m)v_1 - m(u - v_1) \rightarrow v_1 = \frac{mu}{M + 2m},$$

где  $v_1$  — скорость тележки после прыжка первого школьника.

Запишем закон сохранения импульса для случая прыжка второго мальчика, обозначив через  $v_2$  скорость тележки после прыжка второго школьника.

$$(M + m)v_1 = Mv_2 - m(u - v_2).$$

Подставляя значение скорости  $v_1$ , получим:

$$v_2 = \frac{m(2M + 3m)}{(M + 2m)(M + m)}.$$

Найдем отношение модулей скоростей  $v_2$  и  $v_1$ :

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{2M + 3m}{2M + 2m} > 1, \text{ то есть } v_2 > v_1.$$

**Решить самостоятельно**

1. Железнодорожную платформу массой  $m_1 = 20$  т, движущуюся по горизонтальному участку пути со скоростью  $v_1 = 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , догоняет платформа массой  $m_2 = 10$  т, движущаяся со скоростью  $v_2 = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Определите скорость движения платформ после сцепления.
2. Летящий снаряд разорвался на два осколка с одинаковыми массами. Модули скоростей  $v_1 = 300 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  и  $v_2 = 400 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , угол между векторами скоростей осколков равен  $90^\circ$ . Найдите модуль скорости снаряда до разрыва.

*Контрольные работы*

**Вариант 1**

1. Какое из выражений соответствует закону сохранения импульса для случая взаимодействия двух тел?

А)  $\vec{p} = m\vec{v}$ .

- Б)  $\vec{F}\Delta t = m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1$ .
- В)  $m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2$ .
- Г)  $\frac{m_1\vec{v}_1^2}{2} + \frac{m_2\vec{v}_2^2}{2} = \frac{m_1(\vec{v}'_1)^2}{2} + \frac{m_2(\vec{v}'_2)^2}{2}$ .
2. Железнодорожный вагон массой  $m$ , движущийся со скоростью  $v$ , сталкивается с неподвижным вагоном массой  $2m$  и сцепляется с ним. Каким суммарным импульсом обладают два вагона после столкновения?
- А) 0.  Б)  $mv$ .
- В)  $2mv$ .  Г)  $3mv$ .
3. Тележка массой 2 кг, движущаяся со скоростью  $3 \frac{m}{c}$ , сталкивается с неподвижной тележкой массой 4 кг и сцепляется с ней. Чему равна скорость обеих тележек после взаимодействия?
- А)  $0,5 \frac{m}{c}$ .  Б)  $1 \frac{m}{c}$ .
- В)  $1,5 \frac{m}{c}$ .  Г)  $3 \frac{m}{c}$ .
4. При выстреле из пистолета вылетает пуля массой  $m$  со скоростью  $v$ . Какой по модулю импульс приобретает после выстрела пистолет, если его масса в 100 раз больше массы пули?
- А) 0.  Б)  $\frac{mv}{100}$ .
- В)  $mv$ .  Г)  $100mv$ .
5. При выстреле из пистолета вылетает пуля массой  $m$  со скоростью  $v$ . Какую по модулю скорость приобретает после выстрела пистолет, если его масса в 100 раз больше массы пули?
- А) 0.  Б)  $\frac{v}{100}$ .
- В)  $v$ .  Г)  $100v$ .
6. На одном конце неподвижной длинной тележки массой  $m_1$  стоит мальчик массой  $m_2$ . С какой скоростью будет двигаться тележка, если мальчик побежит со скоростью  $v$  относительно тележки?
- А)  $\frac{m_1v}{m_1 + m_2}$ .  Б)  $\frac{m_1v}{m_2}$ .
- В)  $\frac{m_2v}{m_1 + m_2}$ .  Г)  $\frac{m_2v}{m_1}$ .

## Вариант 2

1. Какое из выражений соответствует закону сохранения импульса для случая взаимодействия двух тел?
- А)  $m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2$ .
- Б)  $\frac{m_1\vec{v}_1^2}{2} + \frac{m_2\vec{v}_2^2}{2} = \frac{m_1(\vec{v}'_1)^2}{2} + \frac{m_2(\vec{v}'_2)^2}{2}$ .
- В)  $\vec{p} = m\vec{v}$ .
- Г)  $\vec{F}\Delta t = m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1$ .
2. Тележка массой 3 кг, движущаяся со скоростью  $4 \frac{m}{c}$ , сталкивается с неподвижной тележкой той же массы и сцепляется с ней. Чему равен импульс тележек после взаимодействия?
- А)  $6 \frac{кг \cdot м}{c}$ .  Б)  $12 \frac{кг \cdot м}{c}$ .
- В)  $24 \frac{кг \cdot м}{c}$ .  Г) 0.
3. Тележка массой 3 кг, движущаяся со скоростью  $4 \frac{m}{c}$ , сталкивается с неподвижной тележкой той же массы и сцепляется с ней. Чему равна скорость обеих тележек после взаимодействия?
- А)  $2 \frac{m}{c}$ .  Б)  $3 \frac{m}{c}$ .
- В)  $4 \frac{m}{c}$ .  Г)  $12 \frac{m}{c}$ .
4. Скорость легкового автомобиля в 4 раза больше скорости грузового, а масса грузового — в 2 раза больше массы легкового. Сравните значения модулей импульсов легкового  $p_1$  и грузового  $p_2$  автомобилей.
- А)  $p_1 = p_2$ .
- Б)  $p_1 = 2p_2$ .
- В)  $p_2 = 2p_1$ .
- Г)  $p_1 = 4p_2$ .
5. Неподвижное атомное ядро массой  $M$  испускает частицу массой  $m$ , движущуюся со скоростью  $v$  и отлетает в противоположном направлении. Чему равен модуль скорости ядра при этом?
- А)  $v$ .  Б)  $\frac{mv}{M}$ .

В)  $\frac{mv}{M-m}$        Г)  $\frac{mv}{M+m}$

6. Орудие, не имеющее противооткатного устройства, стреляет снарядом под углом  $\alpha$  к горизонту. Масса снаряда  $m_1$ , его начальная скорость относительно Земли  $v$ . Какова скорость отката орудия, если его масса  $m_2$ ?

А)  $\frac{m_1 v \cos \alpha}{m_2}$        Б)  $\frac{m_2 v \cos \alpha}{m_1}$

В)  $\frac{m_1 v \cos \alpha}{m_1 + m_2}$        Г)  $\frac{m_1 v \cos \alpha}{m_2 - m_1}$

**Контрольная работа повышенного уровня сложности**

**Вариант 1**

1. Снаряд, летевший со скоростью  $v = 450 \frac{м}{с}$ , разорвался на две части массами  $m_1 = 2$  кг и  $m_2 = 8$  кг. Модуль скорости большего осколка  $v_2 = 600 \frac{м}{с}$ , а его направление совпадает с вектором начальной скорости. Определите скорость меньшего осколка.
2. На одном конце неподвижной длинной тележки массой  $m_1 = 25$  кг стоит мальчик массой  $m_2 = 50$  кг. С какой скоростью будет двигаться тележка, если он побежит со скоростью  $v = 3 \frac{м}{с}$  относительно тележки?

3. Из орудия, находящегося на катере массой  $m_1 = 10$  т и движущегося со скоростью  $v_1 = 18 \frac{км}{ч}$ , произведен выстрел в направлении движения под углом  $\alpha = 60^\circ$  к горизонту. Чему равна скорость катера после выстрела, если масса снаряда  $m_2 = 10$  кг, а скорость его при вылете  $v_2 = 1000 \frac{м}{с}$ ?

**Вариант 2**

1. Чему равен секундный расход топлива в момент старта ракеты массой  $m = 10^6$  кг, если она стартует вертикально с ускорением  $a = 3g$ ? Скорость истечения газов относительно ракеты примите равной  $u = 4 \cdot 10^3 \frac{м}{с}$ .
2. Пуля из пневматической винтовки, летящая со скоростью  $v = 50 \frac{м}{с}$ , попадает в неподвижный брусок, лежащий на горизонтальной поверхности стола, и застревает в нем. На какое расстояние передвинется брусок, если его масса в  $n = 49$  раз больше массы пули, а коэффициент трения между бруском и поверхностью стола  $\mu = 0,1$ ?
3. Мальчик, масса  $M$  которого в 3 раза больше массы  $m$  тележки длиной  $l = 5$  м, стоит на ее краю. С какой минимальной скоростью он должен прыгнуть, чтобы попасть на другой конец тележки?

## 4. РАБОТА, МОЩНОСТЬ, МЕХАНИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

*Конспект.  
Таблицы. Схемы*

### Основные физические величины

**Механическая работа  $A$**  — физическая величина, измеряемая, в случае действия постоянной силы, произведением модуля силы  $F$  на модуль перемещения  $S$  и на  $\cos\alpha$  угла между векторами  $\vec{F}$  и  $\vec{S}$  (рис. 254):  $A = FS\cos\alpha$ . Единица работы 1 Дж.

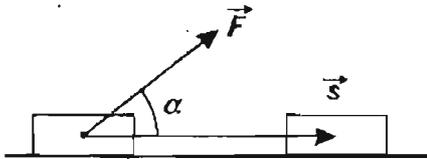


Рис. 254

1 Дж — работа, совершаемая постоянной силой  $F = 1$  Н при перемещении  $S = 1$  м при совпадении направлений векторов  $\vec{F}$  и  $\vec{S}$ .

Из общей формулы следует, что возможны частные случаи (табл. 17).

### Работа переменной силы

В общем случае работа переменной силы находится графически. Для этого необходимо построить график зависимости проекции силы  $F_s$  на касательную к траектории от пройденного пути. Тогда работа вычисляется как площадь (рис. 255).

Есть несколько простых и вместе с тем наиболее важных случаев работы переменной силы.

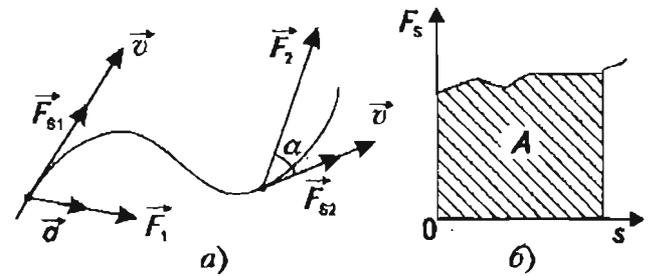


Рис. 255

**Работа силы упругости.** Сила упругости, возникающая при деформации растяжения — сжатия равна  $F_x = -kx$ . Из рис. 256 видно, что работа внешней силы, растягивающей пружину от  $x_1$  до  $x_2$ , положительна, работа упругой силы — отрицательна.

Работа силы упругости вычисляется как площадь заштрихованной трапеции. На отрицательный знак работы силы упругости указывает расположение трапеции под осью  $Ox$ . Из рисунка видно, что площадь трапеции равна:

$$\frac{|F_{x1}| + |F_{x2}|}{2} (x_2 - x_1) = \frac{|kx_1 + kx_2|}{2} (x_2 - x_1).$$

Работа силы упругости равна:

$$A = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}.$$

**Уровень В. Работа силы тяготения  $F = G \frac{Mm}{r^2}$ .** Закон всемирного тяготения показывает, что модуль силы тяготения обратно пропорционален квадрату расстояния между телами:  $F = (GMm) \frac{1}{r^2}$ .

Таблица 17

$F$	$S$	$\alpha$	$A$	Особенности движения
$\vec{F} = 0$	$S = vt$	—	0	Равномерное
$\vec{F} \neq \cos\alpha \neq 0$	$S = v_0t + \frac{at^2}{2}$	$\alpha = 0$	$FS > 0$	Равноускоренное, модуль скорости увеличивается
$\vec{F} = \cos\alpha \neq 0$	$S = v_0t - \frac{at^2}{2}$	$\alpha = 180^\circ$	$FS < 0$	Равноускоренное, модуль скорости убывает
$\vec{F} = \cos\alpha \neq 0$	$S = 2\pi Rn$	$\alpha = 90^\circ$	$FS\cos 90^\circ = 0$	Равномерное движение по окружности радиуса $R$

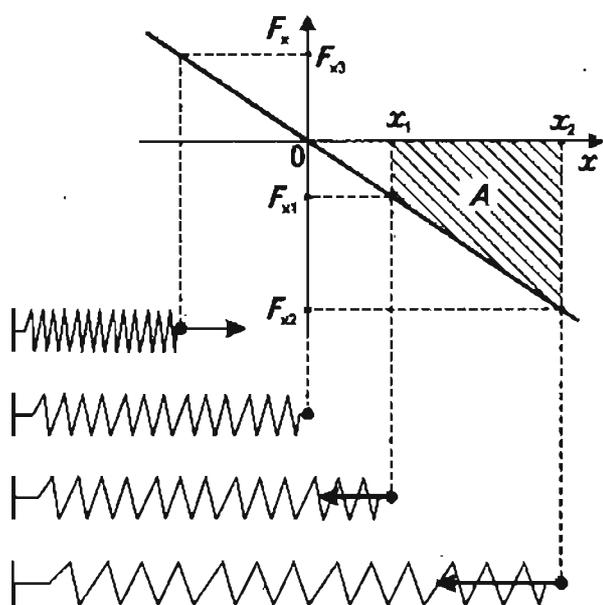


Рис. 256

Если начало координат (рис. 257) совместить с одним из тел, то ясно, что  $F_2 < 0$ . При сближении тел сила тяготения совершает положительную работу, при удалении — отрицательную. Модуль работы находится как площадь заштрихованной «криволинейной» трапеции.

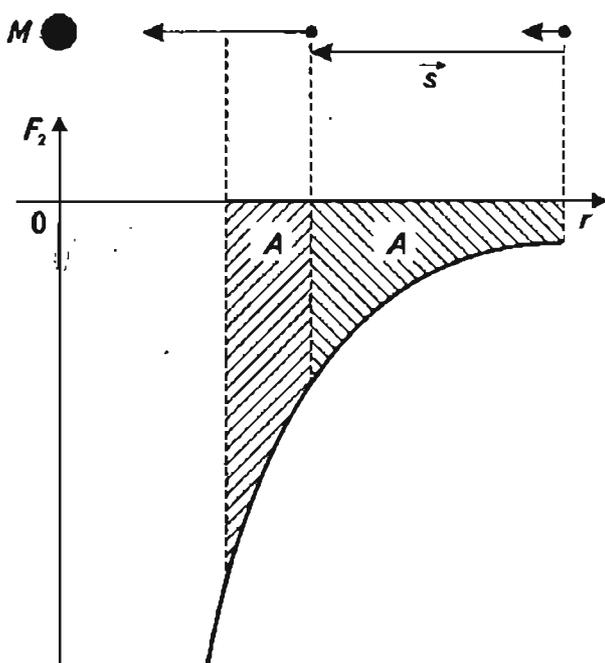


Рис. 257

Расчеты показывают, что эта площадь равна:

$$(GMm) \left( \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right).$$

С учетом выбора знака можно записать:

$$A = (GMm) \left( \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right).$$

При удалении тел  $r_1 < r_2$ , следовательно,  $\frac{1}{r_1} > \frac{1}{r_2}$ , и работа оказывается  $A < 0$ .

С точки зрения работы, совершаемой силой, силы делятся на несколько групп.

К первой группе относятся так называемые *потенциальные силы*. Их работа не зависит от формы траектории, соединяющей две точки. К потенциальным силам относятся силы упругости и силы тяготения (тяжести).

В качестве примера рассмотрим силу тяготения. При перемещении тела  $m$  из точки I в точку II (рис. 258) по траекториям IaII и IbII работы, совершаемые при этом, оказываются одинаковыми, хотя путь по траектории IaII больше, чем по IbII.

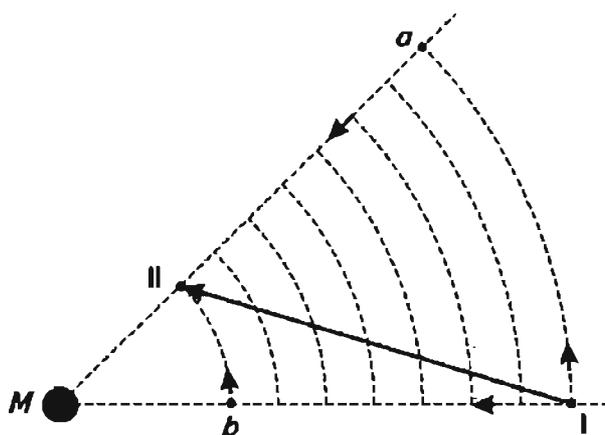


Рис. 258

Работы оказываются одинаковыми потому, что на участках Ia и bII работа сил тяготения равна нулю из-за перпендикулярности силы и перемещения. Если тело  $m$  будет перемещаться по прямой I-II, то работа будет иметь такое же значение: движение по прямой I-II можно представить себе как движение по ломаной с очень мелкими ступеньками.

К *непотенциальным* силам относятся такие, работа которых зависит от траектории, соединяющей

две точки. К ним относится сила трения. Действительно, сила трения всегда направлена противоположно скорости, ее работа всегда отрицательна и увеличивается по модулю при увеличении пути (рис. 259).

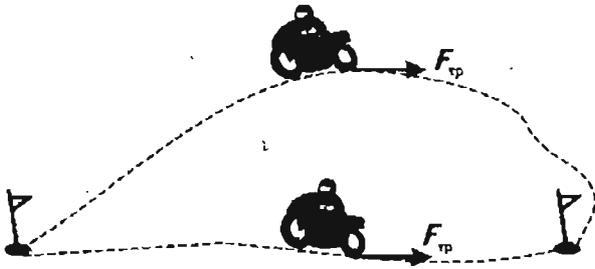


Рис. 259

Представление о *работе силы* позволяет характеризовать количественно эффективность различных машин, механизмов. Такие устройства являются источниками *внешних сил* (чаще всего сил упругости), которые поднимают грузы, кабины лифтов и т. д.

Работа силы, источником которой является механизм или машина, может быть характеристикой этой машины (механизма). Пусть, например, механизм, находящийся на вершине наклонной плоскости (рис. 260), развивает силу  $F_0$ . Эта сила, действующая на груз, обеспечивает его подъем вдоль наклонной плоскости на расстояние  $L$ . Работа силы  $F_0$  равна  $A_0 = F_0 L$ . Так как источником этой силы оказывается двигатель, то часто говорят о работе  $A_0$ , совершенной двигателем. Работа силы тяжести при этом равна  $A = mgh$ . Чаще всего  $A_0 > A$ . Это связано с действием силы трения.

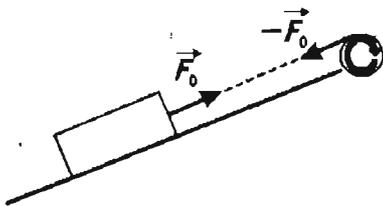


Рис. 260

Величина  $\frac{A}{A_0}$  называется коэффициентом полезного действия двигателя (КПД)  $\eta$ . Итак,  $\eta = \frac{A}{A_0}$ . Обычно  $\eta$  выражают в %.

Существуют разные машины для совершения одной и той же работы. Например, лифты обычные и

скоростные. Величина, характеризующая «быстро-ту» совершения работы, называют **мощностью**.

Мощность  $N = \frac{A_0}{t}$ . Зная мощность механизма, можно определить работу  $A_0 = Nt$ .

Часто мощность зависит от времени. В этом случае работа определяется за время  $(t_2 - t_1)$  как площадь (рис. 261).

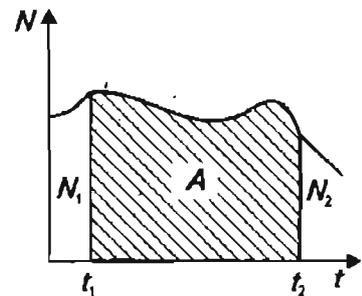


Рис. 261

С механической работой связано представление о **механической энергии**. В процессе совершения работы энергия изменяется. Количественно работа и изменение энергии одинаковы. Однако для того чтобы поставить знак равенства между этими величинами, следует учесть, что работа бывает положительной и отрицательной, а слово «изменение» в физике и математике всегда подразумевает разность между последующим и предыдущим значениями, т. е. «изменение» также может иметь знак «+» и «-». При этом знак работы может не совпадать со знаком изменения энергии. Поэтому в общем виде связь между работой и энергией выражается так

$$A = \pm(E_2 - E_1) = \pm\Delta E.$$

### Потенциальная энергия

**Потенциальная энергия** — энергия взаимодействия тел или частей одного и того же тела. Потенциальная энергия характеризует взаимодействие этих тел только при условии, если работа сил взаимодействия не зависит от формы траектории, соединяющей две точки. Поэтому можно говорить о потенциальной энергии тяготения или энергии упругости, но нельзя говорить о «потенциальной энергии трения». Для нахождения расчетных формул для потенциальной энергии достаточно сравнить выражение для работы и соотношение  $A = \pm\Delta E$ . Рассмотрим примеры

**Потенциальная энергия пружины.** Пусть пружина была растянута из состояния с деформацией  $x_1$  в состояние с деформацией  $x_2$  (рис. 262). При этом работа силы упругости не зависит от способа растяжения и равна:

$$A_{1 \rightarrow 2} = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}.$$

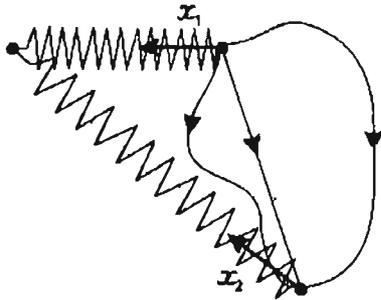


Рис. 262

При растяжении работа отрицательна. Следовательно, при написании формулы  $A_{1 \rightarrow 2} = \pm(E_{П2} - E_{П1})$  мы должны следить за тем, чтобы также получилось отрицательное число. Следовательно:

$$A_{1 \rightarrow 2} = E_{П1} - E_{П2} = -(E_{П2} - E_{П1}) = -\Delta E.$$

Отсюда следует, что  $E_{Пот.пуж} = \frac{kx^2}{2}$ .

График зависимости  $E_{Пот.пуж}$  от  $x$  показан на схеме 19.

**Уровень В. Потенциальная энергия тяготения.** Ранее мы выяснили, что работа силы тяготения при перемещении тела  $m$  из состояния 1 в состояние 2 (рис. 263) равна:

$$A_{1 \rightarrow 2} = GMm \frac{1}{r_2} - GMm \frac{1}{r_1}.$$

По аналогии с пружиной запишем:

$$A_{1 \rightarrow 2} = E_{П1} - E_{П2}.$$

Формулу  $A_{1 \rightarrow 2} = GMm \frac{1}{r_2} - GMm \frac{1}{r_1}$  перепишем:

$$A_{1 \rightarrow 2} = \left[ -GMm \frac{1}{r_1} \right] - \left[ -GMm \frac{1}{r_2} \right].$$

Понятно, что потенциальная энергия тяготения двух тел равна:

$$E_{П.тяг} = -GMm \frac{1}{r}.$$

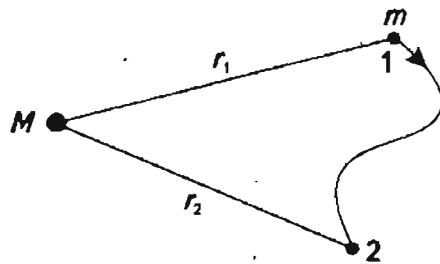


Рис. 263

График зависимости  $E_{Пот.тяг}$  от  $x$  показан на схеме 19.

Вам известно, что потенциальная энергия тела, поднятого над Землей на небольшую высоту  $h$ , равна  $E_{П} = mgh$ .

Получаются две совершенно различные, на первый взгляд, формулы для расчета потенциальной энергии тяготения. В чем тут дело?

Для ответа на этот вопрос применим формулу

$E_{П} = -GMm \frac{1}{r}$  для ситуации, представленной на рис. 264 при  $h \ll R_{Земли}$ . Получим:

$$E_{гр} = -GMm \frac{1}{R+h}.$$

Внесем за скобки  $R$ , получим:

$$E_{гр} = -GMm \frac{1}{R \left(1 + \frac{h}{R}\right)} = -\frac{GMm}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{h}{R}}.$$

Убедимся, что при малых  $h$  можно заменить, с очень маленькой погрешностью, выражение  $\frac{1}{1 + \frac{h}{R}}$

на выражение  $1 - \frac{h}{R}$ .

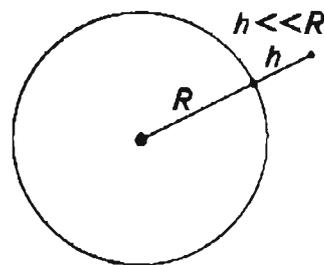


Рис. 264

Пусть, например, высота  $h$  равна 500 м (высота Останкинской телебашни). Тогда,

$$\frac{1}{1 + \frac{0,5 \text{ км}}{6400 \text{ км}}} = 0,999921881,$$

$$1 - \frac{h}{R} = 1 - \frac{0,5 \text{ км}}{6400 \text{ км}} = 0,999921875.$$

Мы видим, что абсолютная погрешность равна 0,00000006.

Относительная погрешность равна:

$$\frac{0,00000006}{1} \cdot 100\% = 0,000006\%.$$

Следовательно, можно записать:

$$E_{\text{п}} = -\frac{GMm}{R} \cdot \frac{1}{1 - \frac{h}{R}} = -\frac{GMm}{R} + \frac{GMm}{R^2} \cdot h = -\frac{GMm}{R} + mgh.$$

Получается, что, определяя потенциальную энергию тела, поднятого над Землей, по формуле  $E_{\text{п}} = mgh$ , мы «недосчитываемся» целых

$$-\frac{GMm}{R} = -\frac{6,7 \cdot 10^{-11} \cdot 6,0 \cdot 10^{21}}{6,4 \cdot 10^6} \cdot 1 \text{ Дж} = -63 \text{ 000 Дж}$$

на каждый кг массы.

Приводит ли этот «недосчет» к каким-либо противоречиям? Оказывается, нет.

Действительно, пусть тело массой 1 кг упадет с вершины Останкинской телебашни на Землю. Чему будет равна работа силы тяжести?

$$A = E_{\text{п1}} - E_{\text{п2}} = \left[ -\frac{GMm}{R} + mgh \right] - \left[ -\frac{GMm}{R} + 0 \right] = mgh.$$

Расчет силы тяжести также дает значение  $mg$ . Ведь сила тяжести равна:

$$\frac{A}{h} = \frac{E_{\text{п1}} - E_{\text{п2}}}{h} = mg.$$

Вычисляя потенциальную энергию тела, поднятого над Землей, по формуле  $E_{\text{п}} = mgh$ , мы считаем, что на Земле она равна нулю. Земля — это нулевой уровень отсчета потенциальной энергии.

При вычислении потенциальной энергии по формуле  $E_{\text{п}} = -GMm \frac{1}{R+h}$ , мы считаем, что на Земле все тела имеют потенциальную энергию

$$E_{\text{п0}} = -\frac{GMm}{R}.$$

Вычисление работы как разницы  $A_{1 \rightarrow 2} = E_{\text{п1}} - E_{\text{п2}}$  и силы как частного  $\frac{A_{1 \rightarrow 2}}{h}$ , дает одинаковые значения при любом выборе нулевого уровня потенциальной энергии.

При вычислении потенциальной энергии нулевой уровень ее отсчета может быть произволен, но всегда должен быть указан.

## Кинетическая энергия тела

**Общие свойства энергии.** При выводе формул для потенциальной энергии мы воспользовались двумя ее свойствами. Первое — позволяет выделить из всех видов энергии только *механическую*. Если при изменении любого вида энергии совершается механическая работа, то происходит преобразование энергии в механическую.

Второе свойство энергии относится к любым видам энергии. Мы видели, что изменение потенциальной энергии не зависит от способа перехода системы из одного состояния в другое.

В этом состоит общее свойство любых видов энергии: энергия — функция состояния. Этим свойством обладает и энергия движения.

Рассмотрим наиболее простой случай — скольжение тела по наклонной плоскости. Пусть скорость тела увеличилась от  $\vec{v}_1$  до  $\vec{v}_2$  при переходе из состояния 1 в состояние 2 (рис. 265). Тогда работа силы тяжести равна:

$$mgh = E_{\text{п1}} - E_{\text{п2}}.$$

Работа силы упругости  $N$  равна нулю, т. к. она перпендикулярна скорости.

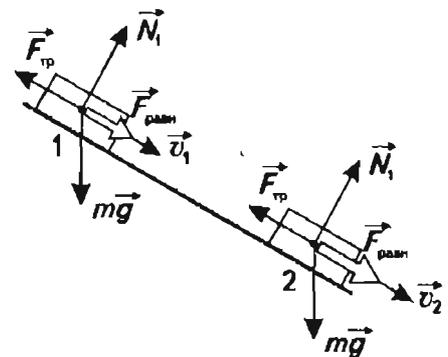


Рис. 265

Работа равнодействующей всех сил равна  $F_p \cdot l = ma \cdot l$ , но:

$$a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2l}.$$

Следовательно:

$$m \frac{v_2^2 - v_1^2}{2l} \cdot l = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Теперь представим себе, что тело переместилось из состояния 1 в состояние 2 по ломаной траектории. Но это перемещение произошло так, что в состояниях 1 и 2 скорости были соответственно  $v_1$  и  $v_2$ . Тогда, применяя второй закон Ньютона и соотношение для ускорения, вновь получим, что работа равнодействующей силы равна:

$$A_{\text{равн}} \cdot l = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Такое доказательство можно провести для любой кривой, соединяющей два состояния, разбивая ее на любые наклонные плоскости (рис. 266). Мы приходим к следующему выводу. По какой бы из траекторий — 1, 2 и 3 — тело не переходило бы из состояния I где его скорость  $v_1$  в состояние II где его скорость  $v_2$ , работа равнодействующей всех сил вычисляется по формуле:

$$A_{\text{равн}} = E_{K2} - E_{K1},$$

$$\text{где } E_K = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}.$$

График зависимости  $E_{\text{кин}}$  от импульса показан на схеме 19.

Эта величина является функцией состояния и называется *кинетической энергией*.

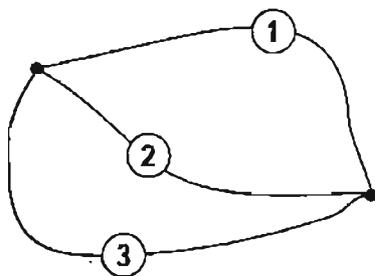


Рис. 266

### Графики зависимостей (уровень Б)

На схеме 19 представлены:

1) График зависимости потенциальной энергии тяготения двух тел  $M$  и  $m$  от расстояния

$E_p = -GMm \frac{1}{R}$  (б) в сравнении с графиком зависимости проекции силы тяготения от расстояния  $F_r = -GMm \frac{1}{r^2}$  (а).

2) График зависимости потенциальной энергии деформированной пружины от деформации

$E_p = \frac{kx^2}{2}$  (б) в сравнении с графиком зависимости проекции силы упругости  $F_x$  от деформации  $F_x = -kx$  (а).

3) График зависимости кинетической энергии от скорости (б) в сравнении с графиком зависимости проекции импульса от скорости (а).

*Лабораторные работы*

### Оценка собственной мощности

**Цель:** оценить мощность, которую вы можете развить при прыжке в высоту с места.

**Оборудование:** мерная лента, напольные весы.

**Вариант выполнения задания**

Мощность  $N$  при прыжке в высоту можно рассчитать, зная высоту  $H$  подъема центра тяжести своего тела и время  $t$  прыжка.

Тогда:

$$N = \frac{A}{t} = \frac{mgH}{t}.$$

Время  $t$  можно рассчитать, зная путь  $s$ , на котором действует сила мышц ног при разгибании колен, и начальную скорость  $v$ , с которой человек отрывается от Земли. Эту скорость легко определить, применив формулу:

$$v^2 = 2gH; \text{ отсюда } v = \sqrt{2gH}.$$

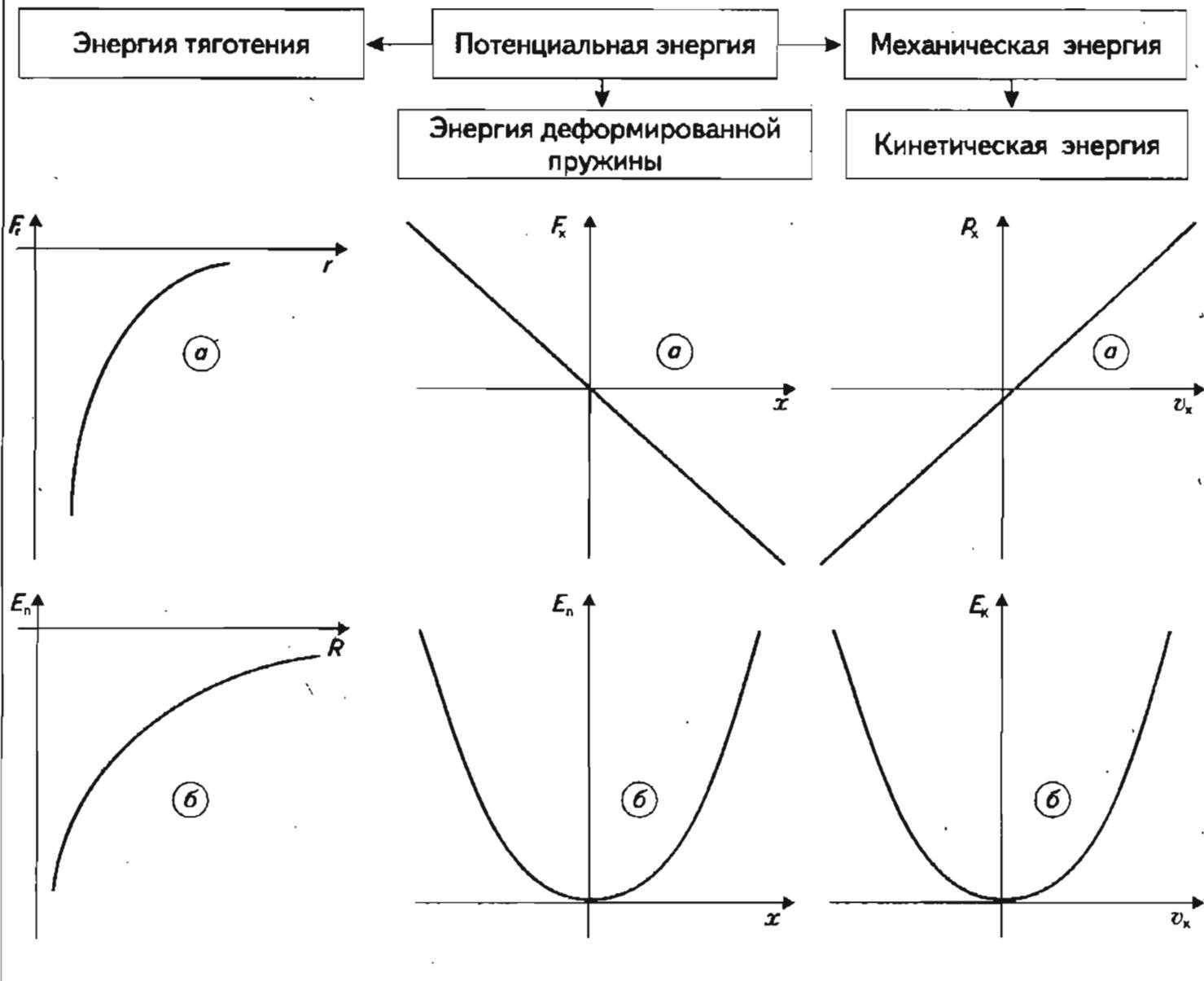
Принимая, что человек до отрыва от поверхности Земли движется с постоянным ускорением, можно записать:

$$s = \frac{vt}{2},$$

$$\text{откуда: } t = \frac{2s}{v} = \frac{2s}{\sqrt{2gH}}.$$

Отсюда следует:

## СХЕМА 19



$$N = \frac{mgH\sqrt{2gH}}{2s}$$

Величины  $H$ ,  $s$  и  $m$  находятся прямым измерением с помощью линейки и напольных весов.

Из полученной формулы видно, что при уменьшении приседания  $s$  мощность растет, но оказывается, что если вы вообще не будете приседать, то не сможете оторваться от Земли.

Совершите ряд прыжков: при разных приседаниях  $s$  измерьте высоты  $H$  своего подъема для каждого прыжка и рассчитайте свою мощность.

Чему равна максимальная мощность, которую вы можете развить при прыжке в высоту с места?

Сравните ее со средней мощностью, развиваемой человеком при ходьбе (60 Вт), а также с так называемой «лошадиной силой», равной 736 Вт. Объясните причины такого сильного различия.

*Тренировки по  
решению задач*

**Примеры решения задач: механическая работа и мощность**

**Пример 1**

Автомобиль массой  $m = 10^3$  кг трогается с места с ускорением  $2 \frac{m}{c^2}$  и разгоняется в течение 6 с на горизонтальном участке пути. Чему равна совершаемая за это время работа силы тяги автомобиля, если коэффициент трения  $\mu = 0,1$ . Сопротивлением воздуха пренебречь.

**Решение**

По определению работа силы  $A = Fscos\alpha$ . В данном случае, как видно из рис. 267,

$$F - F_{тр} = ma; \quad F = F_{тр} + ma.$$

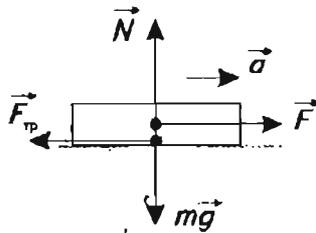


Рис. 267

Учтя, что  $F_{тр} = \mu N$ , а  $N = mg$ , получим:

$$F = m(\mu g + a).$$

Путь, пройденный автомобилем, равен:

$$s = \frac{at^2}{2}.$$

Так как угол  $\alpha = 0$ , то  $cos\alpha = 1$ . Следовательно:

$$A = \frac{m(\mu g + a)at^2}{2};$$

$$A = 10^3(0,1 \cdot 10 + 2) \cdot \left(\frac{2 \cdot 36}{2}\right) = 1,08 \cdot 10^5 \text{ (Дж)}.$$

**Пример 2**

К лежащему на горизонтальной поверхности бруску массой  $m = 10$  кг приложили силу  $F$ , направленную под углом  $\alpha = 60^\circ$  к горизонту, и равномерно переместили брусок на расстояние  $s = 4$  м. Чему равны модуль этой силы и совершенная этой силой работа, если коэффициент трения скольжения между бруском и поверхностью равен  $\mu = 0,3$ .

**Решение**

По определению работа силы  $A = Fscos\alpha$ . Чтобы найти модуль силы, действующей на брусок (рис. 268), применим второй закон Ньютона в проекциях на координатные оси:

$$Fsin\alpha + N - mg = 0;$$

$$Fcos\alpha - F_{тр} = 0.$$

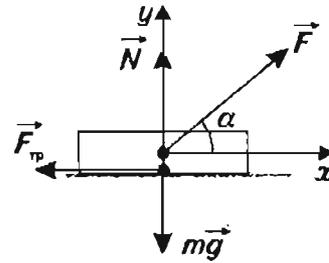


Рис. 268

Учтя, что  $F_{тр} = \mu N$ , получим:

$$F = \frac{\mu mg}{cos\alpha + \mu sin\alpha} = \frac{0,3 \cdot 10 \cdot 9,8}{0,5 + 0,3 \sqrt{\frac{3}{2}}} = 38,7 \text{ (Н)}.$$

$$A = 38,7 \cdot 4 \cdot 0,5 = 77,4 \text{ (Дж)}.$$

**Пример 3**

Чему равна работа силы, которую надо совершить, чтобы сжать пружину на  $x = 5$  см, если для сжатия ее на  $x_0 = 1$  см необходима сила  $F_0 = 10$  Н?

**Решение**

Начертим график зависимости силы упругости пружины от ее деформации (рис. 269). Из графика видно, что:

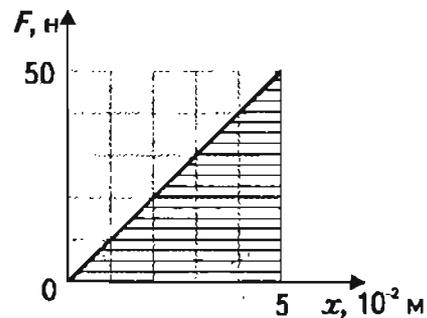


Рис. 269

$$\frac{F_x}{F_0} = \frac{x}{x_0}; F_x = F_0 \frac{x}{x_0} = \frac{10 \text{ Н} \cdot 5 \text{ см}}{1 \text{ см}} = 50 \text{ Н}$$

Искомая работа численно равна площади заштрихованного треугольника:

$$A = S_{\Delta} = \frac{F_x x}{2} = \frac{50 \cdot 0,05}{2} = 1,25 \text{ Дж.}$$

#### Пример 4

Аэросани движутся вверх по слабому подъему с установившейся скоростью  $v_1 = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ; если они движутся в обратном направлении, т. е. под уклон, то при той же мощности двигателя устанавливается скорость  $v_2 = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Какая скорость установится при движении по горизонтальному участку при той же мощности двигателя?

#### Решение

Так как скорость в каждом случае постоянная, то равнодействующая всех сил, действующих на аэросани, равна нулю.

При движении саней вверх:

$$F_{T1} = \frac{N}{v_1} = \mu mg \cos \alpha + mg \sin \alpha.$$

Так как угол  $\alpha$  — мал, то:

$$F_{T1} = \frac{N}{v_1} \approx \mu mg + mg \sin \alpha. \quad (1)$$

При движении саней вниз:

$$F_{T2} = \frac{N}{v_2} = \mu mg - mg \sin \alpha. \quad (2)$$

При движении саней по горизонтальному участку:

$$F_{T3} = \frac{N}{v} = \mu mg. \quad (3)$$

Из выражений (1) и (2) получим:

$$\frac{N}{v_1} + \frac{N}{v_2} = 2\mu mg$$

Учтя выражение (3):

$$\frac{N}{v} = \frac{N}{v_1} + \frac{N}{v_2} \rightarrow v = \frac{2v_1 v_2}{v_1 + v_2}; v = 24 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

### Примеры решения задач: кинетическая и потенциальная энергия

#### Пример 1

Автомобиль движется равноускоренно по горизонтальной дороге и достигает скорости  $\bar{v}$ . Одинакова ли работа, совершаемая двигателем при разгоне до скорости  $\frac{\bar{v}}{2}$  (участок  $0 - \frac{\bar{v}}{2}$ ) и от скорости  $\frac{\bar{v}}{2}$  до  $\bar{v}$  (участок  $\frac{\bar{v}}{2} - \bar{v}$ )?

#### Решение

Будем считать, что работа, совершаемая двигателем, идет только на увеличение кинетической энергии автомобиля:

$$A = \Delta E_k.$$

Следовательно, на участке разгона ( $0 - \frac{\bar{v}}{2}$ ) двигатель совершит работу  $A_1$ , равную:

$$A_1 = \Delta E_{k1} = \frac{m \left( \frac{\bar{v}}{2} \right)^2}{2} - 0 = \frac{m \bar{v}^2}{8}.$$

На участке ( $\frac{\bar{v}}{2} - \bar{v}$ ) работа  $A_2$  равна:

$$A_2 = \Delta E_{k2} = \frac{m \bar{v}^2}{2} - \frac{m \left( \frac{\bar{v}}{2} \right)^2}{2} = \frac{3}{8} m \bar{v}^2.$$

Отношение работ на указанных участках разгона равно:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{1}{3},$$

т. е. чем больше скорость, тем большую работу должен совершить двигатель, чтобы поддерживать ускорение движения постоянным.

Тот же результат можно получить и другим путем. При равноускоренном движении изменение скорости на  $\frac{v}{2}$  происходит за равные интервалы времени. Отношение же путей, пройденных за последовательные равные промежутки времени, при равноускоренном движении с нулевой начальной скоростью равно:

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{1}{3}$$

Отсюда:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{Fs_1}{Fs_2} = \frac{s_1}{s_2} = \frac{1}{3}$$

И, наконец, можно решить задачу графически. Так как движение автомобиля равноускоренное, то  $F = const$ , а функция  $v(t)$  — линейная. Из графика (рис. 270) видно, что площадь трапеции II в 3 раза больше площади треугольника I, а следовательно, путь  $s_2 = 3,5$  м. Искомое отношение работ равно:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{Fs_1}{Fs_2} = \frac{s_1}{s_2} = \frac{1}{3}$$

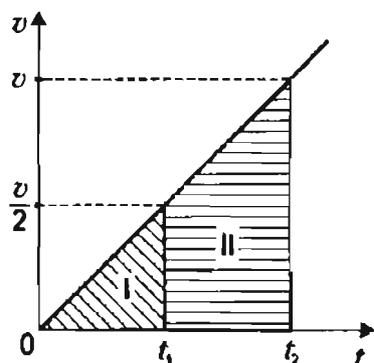


Рис. 270

### Пример 2

Автомобиль массой  $m$ , мощность которого  $N$ , движется по горизонтальному участку дороги с коэффициентом трения  $\mu$ . Через какой минимальный интервал времени скорость автомобиля может достичь значения  $u$ ?

Решение

Максимальная сила тяги автомобиля равна силе трения:

$$F_{\max} = \mu mg$$

Время, в течение которого скорость автомобиля станет равной  $u$ , определится из выражения:

$$t_1 = \frac{u}{a}$$

где  $a = \frac{F_{\max}}{m} = \frac{\mu mg}{m} = \mu g$ .

Отсюда:

$$t_1 = \frac{u}{\mu g}$$

Однако такое решение может оказаться ошибочным, так как оно найдено в предположении, что автомобиль разгоняется под действием постоянной силы, равной максимальному значению силы трения покоя  $F_{\max}$ .

Такое предположение не противоречит условию задачи до тех пор, пока выполняется условие:

$$F_{\max} \Delta s \leq N \Delta t,$$

где  $N$  — максимальная полезная мощность двигателя.

Преобразовав это выражение, получим;

$$F_{\max} \frac{\Delta s}{\Delta t} \leq N; \quad F_{\max} v_0 \leq N.$$

Откуда:

$$v_0 \leq \frac{N}{F_{\max}} = \frac{N}{\mu mg}$$

Следовательно, если

$$u \leq v_0 = \frac{N}{\mu mg},$$

то минимальное время разгона автомобиля до скорости  $u$  равно:

$$t_1 = \frac{u}{\mu g}$$

После достижения автомобилем скорости

$u > v_0 = \frac{N}{\mu mg}$  движение его с постоянным ускорением  $a = \mu g$  при постоянной мощности двигателя становится невозможным, так как изменение кинетической энергии автомобиля не может превышать работы, совершенной двигателем.

Если пренебречь потерями, то, согласно теореме о кинетической энергии, можно записать:

$$A = \Delta E_{ки}; \quad N t_2 = \frac{m u^2}{2} - \frac{m v_0^2}{2},$$

откуда:

$$t_2 = \frac{m(u^2 - v_0^2)}{2N}$$

Таким образом, если после достижения автомобилем скорости  $v_0$  мощность двигателя начинает использоваться полностью, то время, необходимое для достижения скорости  $u$ , большей  $v_0$ , будет складываться из времени, необходимого для достижения скорости  $v_0$ , и времени, которое нужно для увеличения скорости от значения  $v_0$  до  $u$ :

$$t = \frac{v_0}{\mu g} + \frac{m(u^2 - v_0^2)}{2N}$$

Подставляя в это выражение значение скорости  $v_0 = \frac{N}{\mu mg}$ , получим:

$$t = \frac{N}{m\mu^2 g^2} + \frac{mu^2}{2N} - \frac{N}{2m\mu^2 g^2} = \frac{mu^2}{2N} + \frac{N}{2m\mu^2 g^2}$$

Следовательно, скорость автомобиля может возрастать пропорционально времени в первой степени до значения  $v_0 = \frac{N}{\mu mg}$ , а затем увеличиваться пропорционально времени в степени  $\frac{1}{2}$ .

### Пример 3

На какую высоту  $H$  над уровнем воды подпрыгнет пробковый шарик, если его погрузить первоначально в воду на глубину  $h = 0,1$  м (рис. 271)? Плотность воды  $\rho_0 = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , пробки  $\rho_n = 240 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

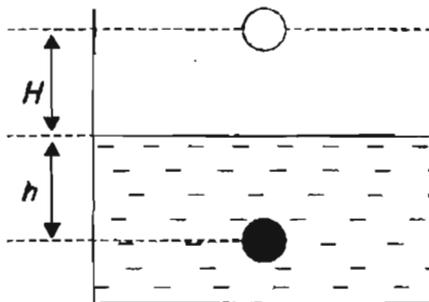


Рис. 271

### Решение

На шарик в воде действует архимедова сила, которая является внешней для системы «тело — Земля», а следовательно, ее работа равна изменению полной механической энергии системы:

$$A_{\text{Арх}} = (E_{n2} + E_{к2}) - (E_{n1} + E_{к1});$$

$$F_{\text{Арх}} h = mg(h + H) - 0 = mg(h + H).$$

Учтя, что  $F_{\text{Арх}} = \rho_0 g V$ , а  $m = \rho_n V$ , получим:

$$\rho_0 g V h = \rho_n V g (h + H) \rightarrow$$

$$\rightarrow H = \frac{\rho_0 - \rho_n}{\rho_0} h = \frac{1000 - 240}{240} 0,1 = 0,32 \text{ (м)}.$$

### Пример 4

Тело скользит по наклонной плоскости с высоты  $h = 0,1$  м. После этого оно продолжает двигаться и останавливается, переместившись на расстояние  $L = 0,5$  м по горизонтали (рис. 272). Определите коэффициент трения, считая его одинаковым на наклонном и горизонтальном участках пути.

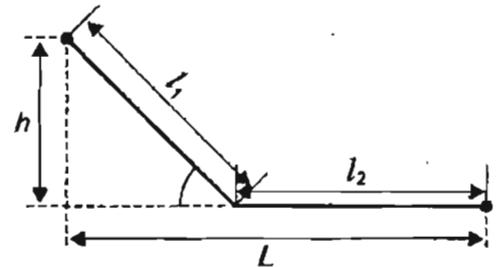


Рис. 272

### Решение

Работа сил трения равна изменению потенциальной энергии тела, взятого со знаком минус.

$$A_1 + A_2 = -mgh,$$

где  $A_1$  — работа сил трения на наклонной плоскости:

$$A_1 = -\mu m g l_1 \cos \alpha \text{ (рис. 272)}$$

$A_2$  — работа сил трения на горизонтальном участке пути:

$$A_2 = -\mu m g l_2.$$

Из полученных выражений следует:

$$h = (l_1 \cos \alpha + l_2) \mu \rightarrow \mu = \frac{h}{L}.$$

### Пример 5

Тело с некоторой высоты брошено в горизонтальном направлении со скоростью  $v_0 = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Через сколько секунд кинетическая энергия увеличится в два раза? Через сколько секунд скорость тела увеличится в два раза? Принять ускорение свободного падения равным  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

**Решение**

При движении тела горизонтальная составляющая скорости будет постоянной и равной  $\vec{v}_0$  (рис. 273).

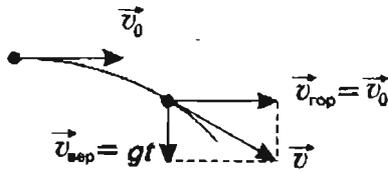


Рис. 273

Вертикальная составляющая будет увеличиваться по закону  $v_{\text{в}} = gt$ . Следовательно:

$$v = \sqrt{v_0^2 + g^2 t^2}.$$

Для ответа на первый вопрос запишем:

$$\frac{E_k}{E_{\text{п}}} = 2 \rightarrow \frac{v_0^2 + g^2 t^2}{v_0^2} = 2 \rightarrow t = \frac{v_0}{g} = 2 \text{ (с)}.$$

Для ответа на второй вопрос запишем:

$$\frac{v}{v_0} = 2 \rightarrow \frac{\sqrt{v_0^2 + g^2 t^2}}{v_0} = 2 \rightarrow \frac{v_0 \sqrt{3}}{v_0} = 3,46 \text{ (с)}.$$

**Задачи для самостоятельного решения: механическая работа и мощность**

1. Автомобиль массой  $m = 2$  т движется с включенным двигателем под уклон по дороге, составляющей с горизонтом угол  $\alpha = 5^\circ$ . Чему равна работа силы тяжести на пути 100 м?
2. Сравните работу силы тяжести, совершенную свободно падающим телом за первую и третью секунды своего падения?
3. Чему равна работа силы упругости, возникающей при растяжении резинового шнура жесткостью  $k = 1000 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$  на  $x = 6$  см?
4. Чему равна работа силы, необходимая для подъема груза массой  $m = 20$  кг на высоту  $h = 5$  м с ускорением  $a = 1,2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ?
5. Чему равна работа силы, необходимая для подъема груза массой  $m = 30$  кг на высоту  $h = 10$  м за  $t = 4$  с?

**Задачи для самостоятельного решения: кинетическая и потенциальная энергии**

1. Груз массой  $m = 5$  кг поднимают на высоту  $h = 3$  м, прикладывая постоянную силу  $F = 100$  Н. Чему равна работа этой силы? Чему равно изменение кинетической и потенциальной энергии груза в конце подъема?
2. Под действием постоянной силы, направленной вертикально вверх, груз массой  $m = 2$  кг поднимают на высоту  $s = 25$  м за  $t = 5$  с. Определите работу этой силы и изменение кинетической энергии груза.
3. Мальчик массой  $m = 2$  кг скатывается с горы, склон которой составляет угол  $\alpha = 30^\circ$  с горизонтальной плоскостью. Какую работу совершают при этом силы тяжести, реакции опоры и трения при прохождении лыжником пути  $s = 200$  м. Коэффициент трения  $\mu = 0,03$ . Определите изменение кинетической энергии лыжника на этом пути.
4. Толкатель ядра сообщает ядру массой 7,3 кг такое ускорение, что его скорость за 2 с становится равной  $15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Какую среднюю мощность развивает спортсмен во время броска?
5. Сколько времени потребуется, чтобы с помощью лифта мощностью 9,2 кВт поднять пианино массой 325 кг на 6-й этаж, расположенный на высоте 16 м?

*Компьютерные работы*

**Вариант 1**

1. По какой формуле следует рассчитывать работу силы  $F$ , если угол между направлением силы и перемещения  $s$  равен  $\alpha$ ?
 

<input type="checkbox"/> А) $\frac{F}{s} \cos \alpha$ .	<input type="checkbox"/> Б) $F s \sin \alpha$ .
<input type="checkbox"/> В) $F s \cos \alpha$ .	<input type="checkbox"/> Г) $\frac{F}{s} \sin \alpha$ .
2. На рис. 274 представлены три варианта взаимного расположения векторов силы  $F$ , действующей на тело, и скорости  $v$  тела. В каком случае работа силы  $F$  отрицательна?
 

<input type="checkbox"/> А) 1.	<input type="checkbox"/> Б) 2.
--------------------------------	--------------------------------

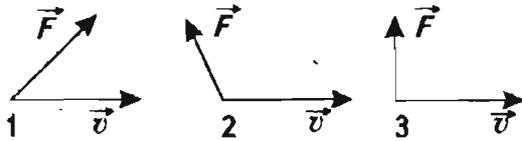


Рис. 274

- В) 3.       Г) Ни в одном из случаев 1–3.
3. Лыжник может спуститься с горы от точки  $M$  до точки  $N$  по одной из траекторий, представленных на рис. 275. При движении по какой траектории работа силы тяжести будет иметь максимальное по модулю значение?

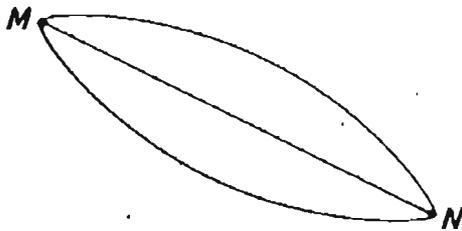


Рис. 275

- А) 1.  
 Б) 2.  
 В) 3.  
 Г) По всем траекториям работа силы тяжести одинакова.
4. Тело массой 1 кг силой 30 Н поднимается на высоту 5 м. Чему равна работа этой силы?  
 А) 0 Дж.       Б) 50 Дж.  
 В) 100 Дж.       Г) 150 Дж.
5. Подъемный кран поднимает равномерно груз в 5000 кг на высоту 10 м за 25 с. Чему равна полезная мощность?  
 А) 0,2 кВт.       Б) 2 кВт.  
 В) 20 кВт.       Г) 200 кВт.
6. Как зависит КПД наклонной плоскости при возрастании угла ее наклона к горизонту при наличии трения?  
 А) Не зависит.  
 Б) Возрастает.  
 В) Убывает.  
 Г) Сначала возрастает, затем убывает.

7. Какое выражение определяет потенциальную энергию тела, поднятого над Землей на высоту  $h \ll R$  ( $R$  – радиус Земли)?

- А)  $\frac{mv^2}{2}$ .       Б)  $mv$ .  
 В)  $mgh$ .       Г)  $\frac{kx^2}{2}$ .

8. Каково наименование единицы кинетической энергии, выраженное через основные единицы Международной системы?

- А) 1 кг·м.       Б) 1  $\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ .  
 В) 1  $\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}$ .       Г) 1  $\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2}$ .

9. Как изменяется потенциальная энергия системы «шар – жидкость» при всплывании пробкового шара в воде и при погружении стального шара в воду?

- А) Увеличится в обоих случаях.  
 Б) Уменьшится в обоих случаях.  
 В) Увеличится в первом случае, уменьшится во втором.  
 Г) Уменьшится в первом случае, увеличится во втором.

#### Вариант 2

1. Как называется единица работы в Международной системе единиц?

- А) Ньютон.       Б) Ватт.  
 В) Джоуль.       Г) Килограмм.

2. Чему равна работа силы  $\vec{F}$ , если угол  $\alpha$  между направлением силы и перемещением тела  $\vec{s}$  равен  $90^\circ$ ?

- А)  $Fs$ .       Б)  $\frac{F}{s}$ .  
 В)  $\frac{s}{F}$ .       Г) 0.

3. На рис. 276 представлены три варианта взаимного расположения векторов силы  $\vec{F}$ , действующей на тело, и скорости  $\vec{v}$  тела. В каком случае работа силы  $\vec{F}$  положительна?

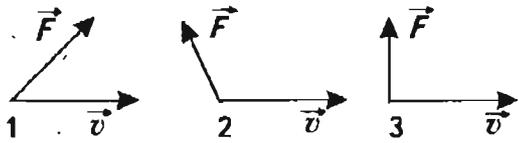


Рис. 276

- А) 1.
  - Б) 2.
  - В) 3.
  - Г) Ни в одном из случаев 1–3.
4. Какая формула связывает мощность двигателя, силу тяги и максимальную скорость?

- А)  $v = F_{\text{тяги}} \cdot N$ .
- Б)  $v = \frac{N}{F_{\text{тяги}}}$ .
- В)  $v = \frac{F_{\text{тяги}}}{N}$ .
- Г)  $v = F_{\text{тяги}} + N$ .

5. Тело массой 2 кг силой 30 Н поднимается на высоту 5 м. Чему равна работа этой силы?

- А) 0 Дж.
- Б) 50 Дж.
- В) 100 Дж.
- Г) 150 Дж.

6. Работа каких из перечисленных сил не зависит от формы пути: силы тяготения (1); силы упругости (2); силы трения (3)?

- А) Только 1.
- Б) Только 2.
- В) Только 3.
- Г) 1 и 2.

7. Чему равна кинетическая энергия тела массой 3 кг, движущегося со скоростью  $4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ?

- А) 6 Дж.
- Б) 12 Дж.
- В) 24 Дж.
- Г) 48 Дж.

Как изменится потенциальная энергия упруго деформированного тела при увеличении его деформации в три раза?

- А) Не изменится.
- Б) Увеличится в 3 раза.
- В) Увеличится в 9 раз.
- Г) Увеличится в 27 раз.

Два автомобиля с одинаковыми массами  $m$  движутся со скоростями  $v$  и  $3v$  относительно Земли в одном направлении. Чему равна кинетичес-

кая энергия второго автомобиля в системе отсчета, связанной с первым автомобилем?

- А)  $mv^2$ .
- Б)  $2mv^2$ .
- В)  $3mv^2$ .
- Г)  $4mv^2$ .

**Контрольная работа повышенного уровня сложности**

**Вариант 1**

1. Канат длиной  $l = 10$  м и массой  $m = 10$  кг перетаскивают с помощью горизонтально направленной силы  $F$  (рис. 277). Чему равна работа этой силы, если коэффициент трения на первом участке  $\mu_1 = 0,2$ , а на втором участке  $\mu_2 = 0,4$ ?

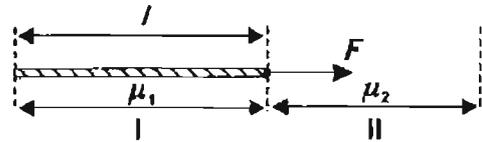


Рис. 277

2. Подъемный кран поднимает груз со скоростью  $v = 0,1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Какой максимальный груз может поднимать этот кран, если мощность мотора  $N = 10$  кВт?
3. Какую работу надо совершить, чтобы растянуть пружину школьного динамометра от 0 до 1 Н? от 1 Н до 2 Н? Жесткость пружины  $k = 40 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ . Сравните работы в первом и втором случаях.
4. Груз массой  $m = 1$  кг поднимают на высоту  $h = 1$  м, прикладывая постоянную силу 18 Н. Какую скорость при этом приобретает груз? Ускорение свободного падения примите равным  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

**Вариант 2**

1. Автомобиль массой  $m = 1,5$  т трогается с места и, двигаясь равноускоренно, проходит путь  $s = 25$  м за время  $t = 5$  с. Какую мощность развивает при этом сила тяги автомобиля?
2. Трактор Т-150 имеет тяговую мощность  $N = 72$  кВт. С какой скоростью может тянуть этот трактор прицеп массой  $m = 3$  т по дороге с уклоном  $\sin \alpha = 0,1$  при коэффициенте трения  $\mu = 0,3$ ?

3. Какую работу надо совершить, чтобы увеличить стороны квадрата, составленного из пружинок жесткости  $k = 100 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$  на  $\Delta l = 2 \text{ см}$ ?
4. Планер массой  $m = 1000 \text{ кг}$ , имеющий скорость

$v_0 = 50 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , начинает спуск с высоты  $H = 10^2 \text{ м}$ . В момент приземления скорость планера равна  $v = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Чему равна работа силы сопротивления воздуха?

## 5. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

*Конспект.  
Таблицы. Схемы*

### Полная механическая энергия и ее изменение

Сумма кинетической энергии тела и потенциальной энергии взаимодействия — это полная механическая энергия  $E = E_k + E_{\text{п}}$ .

Докажем, что изменение полной механической энергии тела равно работе сил трения (сопротивления). Рассмотрим скольжение тела по наклонной плоскости (рис. 278).

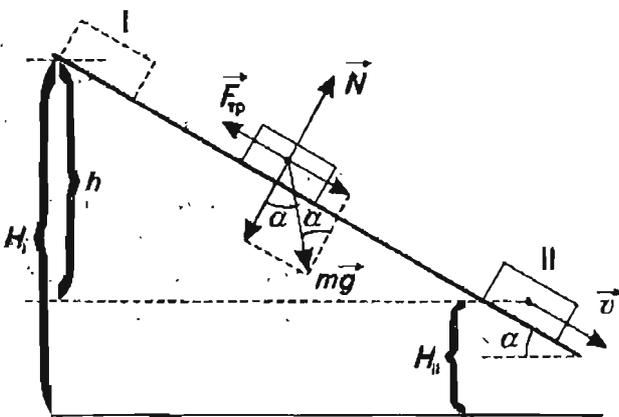


Рис. 278

Полная механическая энергия тела в первом состоянии равна:

$$E_1 = mgH_1.$$

Во втором состоянии она равна:

$$E_{\text{II}} = mgH_{\text{II}} + \frac{mv^2}{2}.$$

Изменение полной энергии равно:

$$\Delta E = E_{\text{II}} - E_1 = \frac{mv^2}{2} - mgh.$$

Работа силы трения при спуске тела равна:

$$A_{\text{тр}} = -F_{\text{тр}}l.$$

С другой стороны, из второго закона Ньютона следует, что

$$mgsin\alpha - F_{\text{тр}} = ma, \text{ но } a = \frac{v^2}{2l}.$$

Следовательно:

$$mgsin\alpha - F_{\text{тр}} = \frac{mv^2}{2l} \text{ или:}$$

$$mgl sin\alpha - F_{\text{тр}}l = \frac{mv^2}{2};$$

$$-F_{\text{тр}}l = \frac{mv^2}{2} - mgh.$$

Итак, этот пример показывает:

$$A_{\text{тр}} = \Delta E.$$

Данное утверждение можно доказать и в общем виде.

Пусть на тело действует несколько сил. Их равнодействующая может быть представлена в виде равнодействующей всех сил трения и всех потенциальных сил. Следовательно, работа равнодействующей  $A$  равна сумме работ трения ( $A_{\text{тр}}$ ) и работе потенциальных сил ( $A_{\text{пот}}$ ):

$$A = A_{\text{тр}} + A_{\text{пот}}$$

Отсюда:

$$\begin{aligned} A_{\text{тр}} &= A - A_{\text{пот}} = (E_{\text{к2}} - E_{\text{к1}}) - (E_{\text{п2}} - E_{\text{п1}}) = \\ &= (E_{\text{к2}} + E_{\text{п2}}) - (E_{\text{к1}} + E_{\text{п1}}). \end{aligned}$$

### Закон сохранения механической энергии

Пусть работа сил трения равна нулю. В этом случае изменение полной механической энергии равно нулю, т. е. энергия сохраняется.

$$(E_{\text{к2}} + E_{\text{п2}}) - (E_{\text{к1}} + E_{\text{п1}}) = 0;$$

$$E_{\text{к2}} + E_{\text{п2}} = E_{\text{к1}} + E_{\text{п1}}.$$

При сохранении полной механической энергии происходит взаимопревращение потенциальной и кинетической энергий.

Действительно, равенство  $E_{\text{к2}} + E_{\text{п2}} = E_{\text{к1}} + E_{\text{п1}}$  можно записать в виде:

$$E_{\text{к2}} - E_{\text{к1}} = -(E_{\text{п2}} - E_{\text{п1}}).$$

Это равенство означает, что изменения кинетической и потенциальной энергий противоположны по знаку: увеличение одной из них сопровождается уменьшением другой, и наоборот.

### Условия применимости закона сохранения механической энергии

Закон сохранения механической энергии выполняется в замкнутых системах, тела в которых взаимодействуют потенциальными силами (силы упругости и тяготения), а силы трения отсутствуют или можно пренебречь работой, совершаемой ими.

В качестве примера можно привести систему тел, взаимодействующих с Землей. При отсутствии сопротивления воздуха механическая энергия взаимодействующих с Землей тел сохраняется.

Закон сохранения механической энергии используется и при расчетах свободного падения тел, и при свободном полете космических аппаратов после выключения двигателей и выхода за пределы атмосферы. Движение планет вокруг Солнца подчиняется закону сохранения механической энергии.

Можно использовать закон сохранения энергии и при действии внешних сил, если эти силы не совершают работу. Например, при колебании груза на нити (рис. 279) работа силы упругости нити равна нулю, и можно воспользоваться законом сохранения механической энергии.

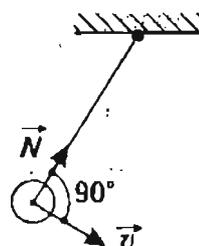


Рис. 279

Вообще, закон сохранения механической энергии выполняется при действии внешних потенциальных сил, если они не изменяются с течением времени. Это связано с тем, что закон сохранения механической энергии — следствие однородности времени. Именно поэтому даже потенциальные силы, зависящие от времени, приводят к невыполнению закона сохранения механической энергии.

### Удар (уровень Б)

Ударом называется явление изменения скоростей твердых тел за весьма малый промежуток времени  $t_0$ , происходящее при их столкновении.

В процессе удара возникают на короткое время весьма большие ударные силы. Импульс этих сил значителен и обычно превосходит импульс внешних сил. Систему можно считать замкнутой, и к системе можно применить закон сохранения импульса.

Если деформации тел при ударе оказываются упругими, то силы взаимодействия потенциальны и можно применять закон сохранения механической энергии.

Пусть два абсолютно упругих шара с массами  $m_1$  и  $m_2$  до удара движутся поступательно со скоростями  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$ , направленными в одну и ту же сторону вдоль линий их центров (рис. 280), и  $v_1 > v_2$ . Необходимо найти скорости шаров  $u_1$  и  $u_2$  после удара.

Для решения необходимо применить оба закона сохранения — энергии и импульса.

$$\begin{aligned} \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} &= \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}, \\ m_1 v_1 + m_2 v_2 &= m_1 u_1 + m_2 u_2. \end{aligned}$$

При абсолютно неупругом ударе после взаимодействия шары вместе движутся со скоростью, кото-

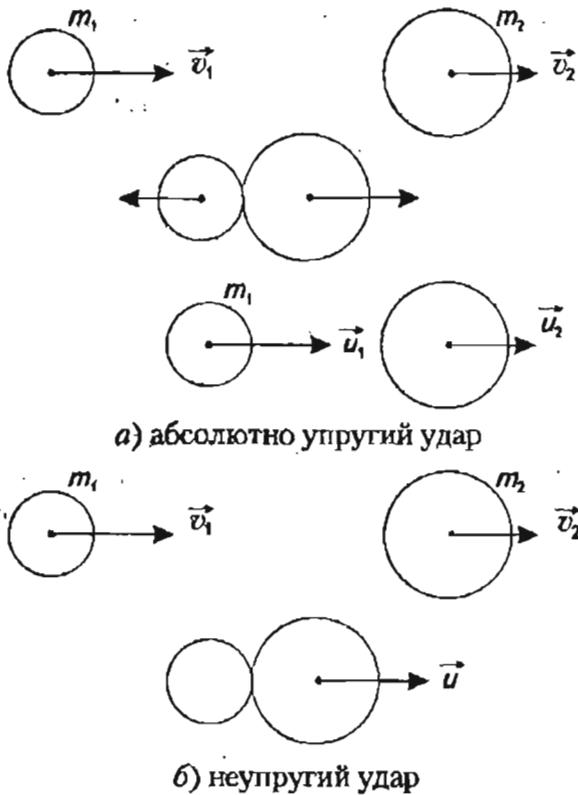


Рис. 280

рая может быть найдена из закона сохранения импульса:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) u.$$

Механическая энергия при этом не сохраняется.

### Движение жидкостей и газов (уровень Б)

Подойдите к водопроводному крану и постепенно увеличивайте поток воды. Вы легко обнаружите, что при небольшом потоке струя воды будет стационарна. Наиболее выразительно это состояние выражает фраза: «вода движется и не движется»: вы не будете отрицать, что вода вытекает из крана, но вместе с тем поток ее как бы неподвижен (стационарен). Это впечатление возникает потому, что в данном (любом) его сечении разные частицы жидкости имеют одну и ту же скорость, хотя в разных сечениях она различна.

Если кран открыть достаточно сильно, то поток перестанет быть стационарным: скорость капель и брызг в данном сечении изменяется в процессе наблюдения за потоком.

Основное свойство стационарного потока жидкости состоит в том, что скорость жидкости в любых двух сечениях обратно пропорциональна площади этих сечений:  $\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}$ .

Объяснить эту закономерность можно следующим образом. Через сечение  $S_1$  за время  $\Delta t$  протечет масса жидкости  $\Delta m_1 = V\rho$ , где  $\rho$  — плотность жидкости,  $V$  — объем жидкости, который за промежуток времени  $\Delta t$  протечет через сечение  $S_1$ . Этот объем равен  $V = S_1 \Delta l_1 = S_1 v_1 \Delta t$ .

Стационарность потока означает, что за время  $\Delta t$  через любое сечение проходит одинаковая масса жидкости:  $S_1 v_1 \rho_1 \Delta t = S_2 v_2 \rho_2 \Delta t$ . Обычно плотность жидкости одинакова во всех сечениях. Следовательно,  $S_1 v_1 = S_2 v_2$  или  $\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}$ .

Рассмотрим стационарное течение идеальной жидкости под действием силы тяжести. Идеальной называется жидкость, при течении которой можно пренебречь внутренним трением. Следовательно, к течению такой жидкости можно применить закон сохранения механической энергии.

В соответствии с этим законом, полная механическая энергия  $E$  части жидкости массой  $m$ , перешедшей из сечения  $S_1$  в сечение  $S_2$ , сохраняется. Из чего складывается эта энергия?

Во-первых, в состав энергии входят кинетическая энергия ( $\frac{mv^2}{2}$ ) и потенциальная энергия притяжения к Земле ( $mgh$ ). Во-вторых, мы должны учесть потенциальную энергию упруго сжатой жидкости. Эта энергия равна произведению давления жидкости  $p$  на ее объем  $V$ , т. е. она равна  $pV$ . В справедливости этого можно убедиться, в частности, из анализа размерностей.

Действительно, размерность  $[pV]$  совпадает с размерностью энергии:

$$[pV] = \text{Па} \cdot \text{м}^3 = \left(\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}\right) \cdot \text{м}^3 = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}.$$

Итак, мы получили, что при стационарном потоке идеальной жидкости сумма:  $\frac{mv^2}{2} + mgh + pV$ , — есть величина постоянная. Заменим массу  $m$  на произведение ( $\rho V$ ). Получим:

$$\frac{\rho V v_1^2}{2} + \rho V g h_1 + P_1 V = \frac{\rho V v_2^2}{2} + \rho V g h_2 + P_2 V.$$

После сокращения на  $V$  получим:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 + P_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 + P_2. \quad (1)$$

Если поток жидкости расположен горизонтально ( $h_1 = h_2$ ), то:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + P_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + P_2. \quad (1^*)$$

Именно это уравнение получил в 1738 г. Даниил Бернулли. С тех пор уравнения (1) и (1\*) называются уравнениями Бернулли.

**Схема: «Закон сохранения энергии в механике»**

В левой части схемы 20 представлены примеры тел и систем, обладающих кинетической и потенциальной энергиями.

В центре приведены два примера преобразования кинетической и потенциальной энергии друг в друга. В одном из них (лук со стрелой) потенциальная энергия деформированного лука (которая, примерно, может быть оценена по формуле  $\frac{kx^2}{2}$ ) преобразуется в кинетическую энергию стрелы. Второй пример показывает, что при полете космического аппарата сохраняется сумма его кинетичес-

**СХЕМА 20**

**Закон сохранения энергии в механике**

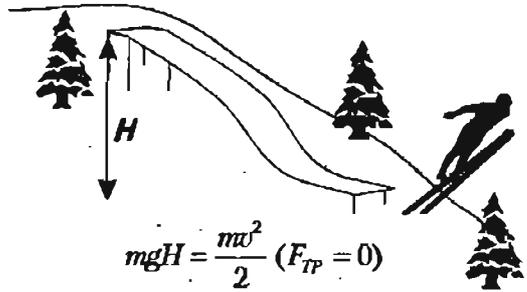
Кинетическая энергия



$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$



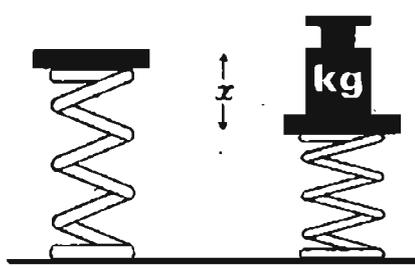
$$\frac{kx^2}{2} = \frac{mv^2}{2}$$



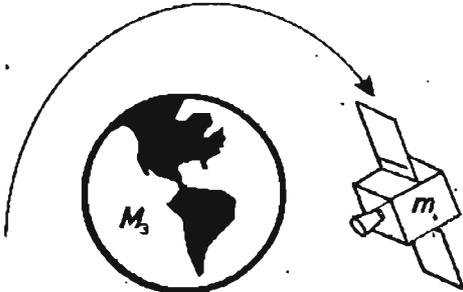
$$mgH = \frac{mv^2}{2} \quad (F_{тр} = 0)$$

$$E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}$$

Потенциальная энергия

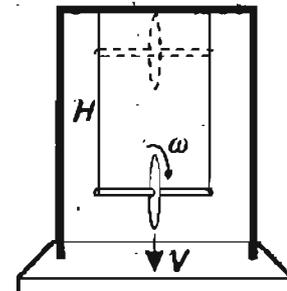


$$E_p = \frac{kx^2}{2}$$



$$\frac{mv^2}{2} - G \frac{mM_3}{R} = const$$

Маятник Максвелла



$$mgH = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}$$

кой энергии  $\frac{m\omega^2}{2}$  и потенциальной энергии тяготения  $(-GmM\frac{1}{R})$ .

Внизу справа представлен прибор, называемый маятником Максвелла. При анализе его движения необходимо учитывать кинетическую энергию вращения  $\frac{J\omega^2}{2}$ , где  $J$  — момент инерции,  $\omega$  — угловая скорость вращения.

*Лабораторные работы*

### Исследование преобразования энергии при свободном падении

Цель работы: убедиться в том, что при свободном падении уменьшение потенциальной энергии тела равно увеличению его кинетической энергии.

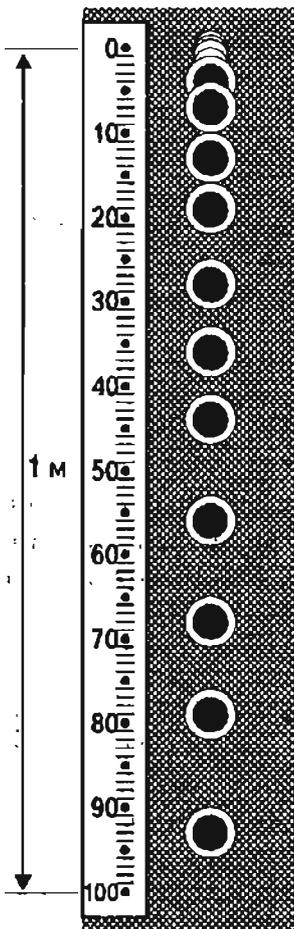


Рис. 281. Стробоскопическая фотография свободно падающего тела. Время между вспышками  $t_0 = \frac{1}{30}$  с.

Первый вариант выполнения основан на использовании стробоскопической фотографии (рис. 281).

Убедитесь в том, что выполняется следствие закона сохранения энергии:

$$mgh = \frac{m\omega^2}{2} \rightarrow gh = \frac{v^2}{2}.$$

Второй вариант выполнения основан на использовании электромагнитного прибора для изучения движения тел.

Спланируйте и осуществите эксперимент по проверке соотношения:

$$mgh = \frac{m\omega^2}{2}$$

с использованием этих приборов.

*Практикум по решению задач*

### Примеры решения задач: закон сохранения механической энергии

Пример 1

На гладкой горизонтальной поверхности лежат два шара массами  $m_1 = 1$  кг и  $m_2 = 4$  кг. Между ними находится пружина жесткостью  $k = 600 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ , сжатая на  $x = 0,1$  м. Рассчитайте скорости шаров после распрямления пружины. Массой пружины пренебрегите.

Решение

Сумма внешних сил тяжести шаров и сил реакции опоры равна нулю. Следовательно, система тел замкнута. В ней действует только консервативная сила упругости пружины, поэтому наряду с законом сохранения импульса можно применить закон сохранения энергии:

$$m_1 v_1 - m_2 v_2 = 0, \quad (1)$$

$$\frac{kx^2}{2} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2}. \quad (2)$$

Решая систему уравнений, получим:

$$v_1 = \sqrt{\frac{kx^2 m_2}{m_1 (m_1 + m_2)}} = \sqrt{\frac{600 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \cdot 0,01 \text{ м}^2 \cdot 2 \text{ кг}}{1 \text{ кг} \cdot 3 \text{ кг}}} = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{kx^2 m_1}{m_2 (m_1 + m_2)}} = \sqrt{\frac{600 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \cdot 0,01 \text{ м}^2 \cdot 2 \text{ кг}}{2 \text{ кг} \cdot 3 \text{ кг}}} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Пример 2

Рассчитайте вторую космическую скорость — минимальную скорость, которую необходимо сообщить кораблю, чтобы он преодолел притяжение Земли. Сравните полученный результат со значением первой космической скорости.

Решение

Следует уточнить постановку вопроса. Если двигатель космического корабля работает и создает силу тяги, равную или большую силы тяготения в каждой точке траектория корабля, то преодолеть притяжение Земли можно, двигаясь с любой малой скоростью.

Вторая космическая скорость — это скорость, необходимая кораблю для преодоления земного тяготения при выключенных двигателях. Эту же скорость приобретает у Земли любое космическое тело, которое на бесконечно большом расстоянии покоилось, а затем стало падать на Землю под действием силы тяготения. В этом случае работа силы тяготения является мерой увеличения кинетической энергии корабля и одновременно мерой уменьшения его потенциальной энергии:

$$A = \Delta E_k = -E_{\text{п}}$$

Трудность расчета этой работы заключается в том, что сила тяготения непрерывно изменяется по закону

$$F = G \frac{mM}{R^2}$$

На очень малом расстоянии ( $r_1 - r_2$ ) (рис. 282) будем считать, что сила тяготения постоянна и равна:

$$F = G \frac{mM}{r_1 r_2}$$

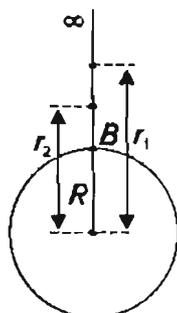


Рис. 282

Тогда работа этой силы будет равна:

$$\Delta A = F(r_1 - r_2) = G \frac{mM}{r_1 r_2} (r_1 - r_2) = GmM \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Суммируя таким же способом все участки пути от  $\infty$  до точки B, лежащей на поверхности Земли, получим;

$$A = \Sigma \Delta A = GmM \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{\infty} \right) = \frac{GmM}{R}$$

Этот результат, полученный упрощенным способом, совпадает с результатом, получаемым более строгими способами. Он позволяет рассчитать вторую космическую скорость  $v_{\text{II}}$ :

$$A = \Delta E_k = E_k - 0 = E_k$$

$$G \frac{mM}{R} = \frac{mv_{\text{II}}^2}{2}$$

отсюда:

$$v_{\text{II}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \tag{1}$$

$$v_{\text{II}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Нм}^2}{\text{кг}^2} \cdot 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}}{6,4 \cdot 10^6 \text{ м}}} = 11,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Первая космическая скорость определяется уравнением

$$v_{\text{I}} = \sqrt{\frac{GM}{R}} \tag{2}$$

Сравнивая выражения (1) и (2) получим:

$$v_{\text{II}} = v_{\text{I}} \sqrt{2}$$

Приняв, что потенциальная энергия бесконечно удаленного от Земли тела равна нулю ( $E_{\text{п}\infty} = 0$ ), для расстояния R от центра Земли получим:

$$E_{\text{п}} = E_{\text{пR}} - E_{\text{п}\infty} = -A; E_{\text{пR}} = -A = -G \frac{mM}{R}$$

Полученное выражение для потенциальной энергии тела, находящегося на расстоянии R от центра тяготения, очень важно, и мы будем его использовать при решении ряда задач.

Пример 3

Рассмотрите преобразование энергии при свободном падении в разных системах отсчета.

Запишем закон сохранения энергии, рассматривая движение камня в системе отсчета, связанной с цен-

тром масс системы «камень — Земля» (рис. 283). К моменту падения камня на Землю вся его потенциальная энергия  $mgh$  перешла в кинетическую энергию  $\frac{mv^2}{2}$ :

$mgh = \frac{mv^2}{2}$ , где  $v$  — скорость камня перед ударом о Землю.

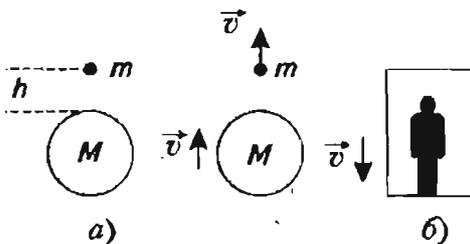


Рис. 283

Запишем закон сохранения энергии, рассматривая движение в системе отсчета, связанной с лифтом, который движется вниз с постоянной скоростью  $v$  относительно Земли. В этой системе отсчета камень в начальный момент имел кинетическую энергию  $\frac{mv^2}{2}$  и потенциальную энергию  $mgh$ . К моменту падения камня на Землю его и кинетическая, и потенциальная энергии равны нулю, так что для всей системы можно записать:

$$mgh + \frac{mv^2}{2} = 0 + 0 = 0.$$

Получается, что закон сохранения энергии не выполняется в системе «лифт», но выполняется в системе отсчета, относительно которой лифт движется с постоянной скоростью. Парадокс?!

### Решение

В системе отсчета, связанной с центром масс системы тел «камень — Земля», в начальный момент Земля покоится, и вся энергия системы равна потенциальной энергии камня. К моменту падения камня на Землю энергия системы равна  $\frac{mv^2}{2} + \frac{Mu^2}{2}$ , где  $v$  — скорость, которую приобрел камень под действием силы притяжения Земли, а  $u$  — скорость, которую приобрела Земля под действием силы притяжения камня. Найдем скорость  $u$ , воспользовавшись законом сохранения импульса:

$mv - Mu = 0$ , откуда

$$u = \frac{m}{M} v.$$

Теперь запишем закон сохранения энергии системы:

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + M \frac{\left(\frac{m}{M} v\right)^2}{2} = \frac{mv^2}{2} \left(1 + \frac{m}{M}\right)$$

Эта запись «абсолютно строгая». Однако ясно, что во всех реальных задачах (о падении тел на Земле)  $m \ll M$  и величина  $\frac{m}{M}$  — ничтожно мала по сравнению с 1, так что ею можно пренебречь. Тогда в системе отсчета, связанной с центром масс системы тел «камень — Земля», закон сохранения энергии запишется так:

$$mgh = \frac{mv^2}{2}.$$

В системе отсчета «лифт» начальная энергия системы «камень — Земля» равна  $mgh + \frac{mv^2}{2} + \frac{Mv^2}{2}$ , к моменту падения камня энергия системы равна  $\frac{Mu^2}{2}$ , где  $u$  — скорость Земли к этому моменту. Воспользовавшись законом сохранения импульса  $-mv + Mu = Mu$ , найдем  $u$ :

$$u = v \left(1 + \frac{m}{M}\right)$$

Мы раньше считали, что энергия Земли не меняется и к моменту падения камня равна  $\frac{Mv^2}{2}$ , т. е. мы пренебрегали величиной

$\frac{Mu^2}{2} - \frac{Mv^2}{2} = mv^2 + \frac{m}{M} \cdot \frac{mv^2}{2}$ , которая больше кинетической энергии камня. Очевидно, что в этом была наша ошибка, которая и привела к парадоксу. «Строго» закон сохранения энергии системы следует записать так:

$$mgh + \frac{mv^2}{2} + \frac{Mv^2}{2} = \frac{Mu^2}{2} + mv^2 + \frac{m}{M} \cdot \frac{mv^2}{2}.$$

Используя условие «большого» тела, т. е. учитывая, что  $m \ll M$ , мы можем пренебречь величиной

$\frac{m}{M} \cdot \frac{mv^2}{2}$ , и получаем то же выражение, что и в первом случае:

$$mgh = \frac{mv^2}{2}$$

Итак, в системе отсчета, связанной с центром масс системы «камень–Земля», в которой «большое» тело — Земля — первоначально покоится, изменением энергии «большого» тела можно пренебречь. В системе «лифт» «большое» тело Земля имеет начальную скорость, изменение ее энергии сравнимо с изменением энергии камня, и пренебрегать этим изменением нельзя.

Пример 4

Рассчитайте значение третьей космической скорости, т. е. минимальной скорости, которую надо сообщить космическому кораблю, стартующему с Земли, чтобы он смог покинуть пределы Солнечной системы.

Решение

Для того чтобы покинуть пределы Солнечной системы, космическая ракета массой  $m$  должна обладать скоростью  $v_{pc}$  относительно Солнца, определяемой законом сохранения энергии:

$$\frac{mv_{pc}^2}{2} - \frac{GmM_c}{R_{3c}} = 0,$$

где  $M_c = 2 \cdot 10^{30}$  кг — масса Солнца;  $R_{3c} = 1,5 \cdot 10^{11}$  м — радиус земной орбиты. Из этого выражения найдем скорость ракеты относительно Солнца:

$$v_{pc} = \sqrt{\frac{2GM_c}{R_{3c}}}; v_{pc} = 4,22 \cdot 10^4 \frac{м}{с}$$

Ракета, вследствие движения вместе с Землей по орбите вокруг Солнца, уже обладает скоростью, которую можно найти, применив второй закон Ньютона:

$$\frac{GmM_c}{R_{3c}^2} = \frac{mv_3^2}{R_{3c}}$$

Отсюда:

$$v_3 = \sqrt{\frac{GM_c}{R_{3c}}}, v_3 = 2,98 \cdot 10^4 \frac{м}{с}$$

Следовательно, при разгоне ракеты в направлении вектора скорости движения Земли по ее орбите вокруг Солнца скорость космической ракеты  $v_{p3}$

относительно Земли для выхода за пределы Солнечной системы должна быть равна:

$$v_{p3} = v_{pc} - v_3 = v_3(\sqrt{2} - 1); v_{p3} = 1,24 \cdot 10^4 \frac{м}{с}$$

Для того чтобы удалить корабль из поля тяготения Земли, ему надо сообщить вторую космическую скорость (ее мы рассчитали в предыдущей задаче):

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2GM_3}{R_3}}$$

где  $M_3 = 6 \cdot 10^{24}$  кг — масса Земли;  $R_3 = 6,4 \cdot 10^6$  м — радиус Земли.

$$v_{II} = 1,12 \cdot 10^4 \frac{м}{с}$$

Следовательно, кинетическая энергия  $E_K$ , которую надо сообщить космическому кораблю для того, чтобы он покинул Солнечную систему, складывается из кинетической энергии  $E_{K1}$ , необходимой для того, чтобы его удалить из поля тяготения Земли, и кинетической энергии  $E_{K2}$ , необходимой для того, чтобы он с орбиты Земли ушел в космическое пространство:

$$E_{K3} = E_{K1} + E_{K2},$$

$$\frac{mv_{III}^2}{2} = \frac{mv_{II}^2}{2} + \frac{mv_{p3}^2}{2}, \text{ отсюда}$$

$$v_{III} = \sqrt{v_{II}^2 + v_{p3}^2},$$

$$v_{III} = \sqrt{\left(1,12 \cdot 10^4 \frac{м}{с}\right)^2 + \left(1,24 \cdot 10^4 \frac{м}{с}\right)^2} = 1,67 \cdot 10^4 \frac{м}{с}$$

Примеры решения задач: упругий и неупругий удары

Пример 1

Платформа массой  $m$ , движущаяся по горизонтальной поверхности без трения со скоростью  $v$ , сталкивается с неподвижной платформой массой  $m$ . Чему равна скорость  $u$  платформ после срабатывания автосцепки (рис. 284)? Чему равно количество теплоты, выделенное при столкновении?



Рис. 284

## Решение

Система тел, состоящая из двух платформ, является замкнутой, к ней можно применить закон сохранения импульса:

$$mv = 2mu; u = \frac{v}{2}.$$

Закон сохранения механической энергии в этой задаче применять нельзя, так как из условия задачи нельзя быть уверенным, что удар был абсолютно упругим и не произошло превращения механической энергии в другие виды энергии.

В этом легко убедиться, рассчитав изменение механической энергии платформ до и после взаимодействия:

$$E_1 - E_2 = \frac{mv^2}{2} - \frac{2mu^2}{2} = \frac{mv^2}{4}.$$

Так как эта величина положительна, механическая энергия платформ после взаимодействия всегда меньше начальной энергии, т. е. часть энергии превращается во внутреннюю энергию платформ.

В нашем частном случае равенства масс платформ в тепло превращается половина начального запаса механической энергии:

$$Q = \frac{mv^2}{4}.$$

## Пример 2

Определите количество теплоты, выделившееся при неупругом столкновении шаров массой  $m$ , движущихся навстречу друг другу со скоростями  $v$  относительно Земли в разных системах отсчета.

Первый ученик. Рассматривая явление в системе отсчета, связанной с поверхностью Земли (рис. 285 а), получим:

$$\Delta E_{K1} = \frac{mv^2}{2} + \frac{mv^2}{2} - 0 = mv^2.$$

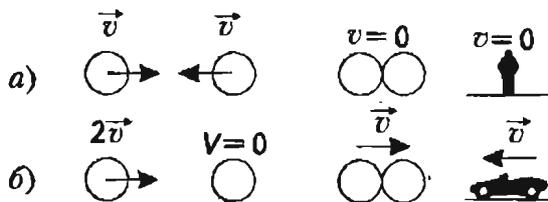


Рис. 285

Это следует из закона сохранения импульса:

$$mv - mv = 2mu' \rightarrow u' = 0.$$

При рассмотрении столкновения шаров в системе отсчета, связанной с Землей, вся кинетическая энергия шаров, превращается в их внутреннюю энергию.

Второй ученик. При рассмотрении явления в инерциальной системе отсчета, движущейся относительно Земли со скоростью  $v$  (рис. 285, б), суммарная кинетическая энергия обоих шаров равна:

$$\Delta E_{K2} = \frac{m(2v)^2}{2} = 2mv^2,$$

что вдвое больше суммарной кинетической энергии шаров в первом случае.

Но в тепло превращается не вся кинетическая энергия шаров, так как они не останавливаются, как в первом случае, а продолжают двигаться со скоростью  $u_2$ .

$$Q = \Delta E = \frac{m(2v)^2}{2} - \frac{2m}{2}u_2^2,$$

где  $u$  — скорость шаров после неупругого взаимодействия. Рассчитаем ее, применив закон сохранения импульса:

$$m2v = 2mu' \rightarrow u' = v.$$

Отсюда следует,

$$Q = 2mv^2 - mv^2 = mv^2,$$

что согласуется с результатом, полученным первым учеником.

## Пример 3

Пуля массой  $m_1$ , летящая горизонтально со скоростью  $v$ , попадает в цилиндр массой  $m_2$ , который может вращаться вокруг горизонтальной оси, и застревает в нем. Барабан укреплен на тележке массой  $M$ .

В I случае цилиндр начинает вращаться; во II случае цилиндр остается неподвижным.

В каких случаях (I, II) тележка приобретет большую скорость (рис. 286)? Трением пренебречь.

Первый ученик. В случае II пуля не закручивает цилиндр, и вся ее кинетическая энергия полностью идет на увеличение скорости тележки с цилиндром.

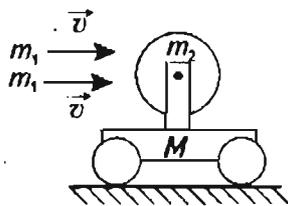


Рис. 286

В случае I часть энергии расходуется на приведение цилиндра во вращение. Следовательно, в случае II тележка получает большую скорость.

Второй ученик. Записываем закон сохранения импульса в виде:

$$m_1 v = (m_1 + m_2 + M)u.$$

Отсюда следует, скорость тележки одинакова в обоих случаях и равна:

$$u = \frac{m_1 v}{m_1 + m_2 + M}.$$

Кто из них прав?

Решение

Прав второй ученик, так как применил закон сохранения импульса для замкнутой системы «пуля-цилиндр-тележка». Импульс вращающегося цилиндра равен нулю.

Первый ученик правильно учитывает энергию  $E_{\text{сп}}$ , которую забирает вращающийся цилиндр, но не учитывает, что часть механической энергии пули в обоих случаях превращается во внутреннюю энергию при неупругом взаимодействии, т. е. выделится тепло ( $Q = \Delta U$ ).

Закон сохранения энергии следует для обоих случаев записать в следующем виде:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{m_1 + m_2 + M}{2} u^2 + E_{\text{сп}} + Q.$$

Первое слагаемое для обоих случаев одинаковое, второе слагаемое для случая II обращается в ноль, а следовательно, в этом случае выделится больше тепла.

Пример 4

Пуля массы  $m$ , движущаяся со скоростью  $v$ , попадает в платформу с песком, движущуюся со скоростью  $u$  в том же направлении, и застревает в ней. Найдем количество теплоты, выделяющееся при этом.

Первый ученик. В системе отсчета, связанной с Землей:

$$Q_1 = \frac{mv^2}{2} - \frac{mu^2}{2} = \frac{m}{2}(v^2 - u^2).$$

Второй ученик. В системе отсчета, связанной с платформой:

$$Q_2 = \frac{m}{2}(v - u)^2.$$

Получился парадокс: возможно, что в одной системе отсчета пуля расплавится, а в другой — нет?

Решение

Изменения кинетической энергии пули в выбранных системах отсчета действительно различны:

$$\Delta E_1 = -\frac{m}{2}(v^2 - u^2);$$

$$\Delta E_2 = -\frac{m}{2}(v - u)^2.$$

Однако часть этой энергии расходуется на увеличение энергии платформы  $\Delta E_{\text{пл}}$ . В системе отсчета, в которой платформа неподвижна, изменением энергии платформы можно пренебречь, так как  $M \gg m_{\text{пл}}$ . В этом случае количество выделившегося тепла равно

$$Q = -\Delta E_2 = -\frac{m}{2}(v - u)^2.$$

В системе отсчета «Земля» платформа двигалась со скоростью  $u$ , следовательно, пренебречь изменением энергии платформы нельзя.

Действительно, изменение энергии платформы в этой системе отсчета равно:

$$\Delta E_{\text{пл}} = \frac{M(u + \Delta u)^2}{2} - \frac{Mu^2}{2} = M|u| |\Delta u|,$$

где  $\Delta u$  — изменение скорости платформы после взаимодействия с пулей. Согласно закону сохранения импульса:

$$m(v - u) = M\Delta u,$$

то есть:

$$\Delta u = \frac{m(v - u)}{M}.$$

Следовательно:

$$\Delta E_{\text{пл}} = M|u| \frac{m(v - u)}{M} = mu(v - u).$$

С учетом этого изменения энергии платформы можно записать:

$$-\Delta E_1 = Q + \Delta E_{\text{пл}},$$

откуда:

$$\begin{aligned} Q &= -\Delta E_1 - \Delta E_{\text{пл}} = \frac{m}{2}(v^2 - u^2) - m|\bar{u}|(|\bar{v}| - |\bar{u}|) = \\ &= \frac{m}{2}(v - u)^2, \end{aligned}$$

что согласуется с результатом первого ученика.

### Пример 5

Шар массой  $m_1$ , движущийся со скоростью  $v_1$ , сталкивается с неподвижным шаром массой  $m_2$ . Считая удар центральным и упругим, найдите:

- скорость обоих шаров после удара;
- долю кинетической энергии, переданной первым телом второму. Сравните случаи:

$$m_1 = \frac{m_2}{99};$$

$$m_1 = m_2;$$

$$m_1 = 99m_2.$$

Решение

Запишем закон сохранения импульса в проекции на ось  $Ox$  и закон сохранения энергии:

$$\begin{aligned} m_1 v_1 &= m_1 v_1' + m_2 v_2'; \\ \frac{m_1 v_1^2}{2} &= \frac{m_1 v_1'^2}{2} + \frac{m_2 v_2'^2}{2}. \end{aligned}$$

Проведем математические преобразования:

$$m_1(v_1 - v_1') = m_2 v_2'; \quad (1)$$

$$m_1(v_1^2 - v_1'^2) = m_2 v_2'^2. \quad (2)$$

Разделив выражение (2) на (1), получим:

$$v_1 + v_1' = v_2'. \quad (3)$$

Решая совместно уравнения (1) и (3), получим:

$$v_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1; \quad v_2' = \frac{2m_1 v_1}{m_1 + m_2}.$$

Изменение кинетической энергии первого шара равно:

$$\Delta E_{K1} = \frac{m_1 v_1'^2}{2} - \frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_1 v_1^2}{2} \left[ 1 - \left( \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \right)^2 \right],$$

а доля энергии, переданная второму шару, равна:

$$\frac{\Delta E_{K1}}{E_{K1}} = 1 - \left( \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \right)^2.$$

При выполнении условия  $m_1 = \frac{m_2}{99}$  получаем:

$$v_1' = -0,98v_1; \quad v_2' = 0,02v_1; \quad \frac{\Delta E_{K1}}{E_{K1}} = 0,04.$$

Первый шар будет двигаться, практически, с той же по модулю скоростью, но в противоположном направлении. Доля переданной энергии мала. Скорость второго шара мала.

При выполнении условия  $m_1 = m_2$  получаем:

$$v_1' = 0; \quad v_2' = v_1; \quad \frac{\Delta E_{K1}}{E_{K1}} = 1.$$

Происходит обмен скоростями и полная передача энергии одного шара второму.

При  $m_1 = 99m_2$ :

$$v_1' = 0,98v_1; \quad v_2' = 1,98v_1; \quad \frac{\Delta E_{K1}}{E_{K1}} = 0,04.$$

Первый шар будет двигаться в том же направлении и практически с той же по модулю скоростью. Доля переданной энергии второму шару мала, однако скорость второго шара почти в два раза будет превышать скорость первого.

При  $m_1 \gg m_2$  можно считать, что  $v_2' = 2v_1$ . Этот случай нередко встречается при решении задач.

### Задачи для самостоятельного решения: закон сохранения энергии

- Небольшое тело соскальзывает без трения по наклонной плоскости, переходящей в «петлю Нестерова», с высоты  $H = 2R$ , где  $R = 0,6$  м — радиус петли (рис. 287). На какой высоте  $h$  тело оторвется от петли? С какой минимальной высоты  $H_{\text{min}}$  надо отпустить тело, чтобы оно не оторвалось от петли?

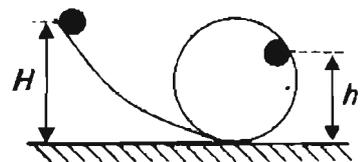


Рис. 287

- Два одинаковых шара подвешены на подвесах одинаковой длины  $l = 0,4$  м: первый — на нерастяжимой и невесомой нити, второй — на жестком и невесомом стержне. Какие минимальные скорости надо сообщить шарам в обоих случаях, чтобы они начали вращаться по окружности радиусом  $l$  в вертикальной плоскости? Ускорение свободного падения принять равным  $10 \frac{м}{с^2}$ .
- Однородный стержень длиной  $l = 0,3$  м может вращаться вокруг горизонтальной оси в вертикальной плоскости. Определите минимальную скорость, которую надо сообщить нижнему концу стержня, чтобы он отклонился на угол  $90^\circ$ .
- Баллистический пистолет, жесткость пружины которого  $k = 100 \frac{Н}{м}$ , расположен на высоте  $h = 2,5$  м над поверхностью Земли. Из него произвели три выстрела снарядом массой  $m = 0,02$  кг, сжав пружину на  $x = 0,1$  м: первый выстрел — вертикально вверх, второй — вниз, третий — горизонтально. Сравните модули скоростей снарядов при достижении поверхности Земли ( $g = 10 \frac{м}{с^2}$ ).
- Небольшое тело начинает соскальзывать с вершины гладкой сферы радиуса  $R = 0,3$  м. На какой высоте  $h$  от вершины сферы тело оторвется от поверхности сферы?
- Мальчик, стреляя из рогатки, натянул резиновый шнур так, что его длина стала больше на  $x = 10$  см. С какой скоростью полетел камешек массой  $m = 20$  г? Для растягивания шнура на  $x_1 = 1$  см требуется сила  $F = 10$  Н.

**Задачи для самостоятельного решения: упругий и неупругий удар**

- На неподвижный шар массой  $M = kt$  налетает шар массой  $m$  со скоростью  $v$ . Чему равны скорости шаров после центрального упругого столкновения? Какова зависимость переданной при ударе энергии от отношения масс  $k = \frac{M}{m}$ ?
- Гладкий бильярдный шар налетает на другой такой же шар. Чему равен угол разлета шаров при упругом нецентральной столкновении?

- Тело очень большой массы  $M$  движется со скоростью  $v = 10 \frac{м}{с}$  и сталкивается с неподвижным шаром массой  $m \ll M$ . Рассчитайте скорость шара  $u$  после упругого столкновения.
- Шар массой  $m = 0,4$  кг, движущийся со скоростью  $v$ , налетает на массивную стенку ( $M_{ст} \gg m$ ), движущуюся со скоростью  $u$ :
  - навстречу шару;
  - в ту же сторону, что и шар.
 Чему равна скорость шара после упругого столкновения со стенкой?

*Контрольные работы*

**Вариант 1**

- Какое из приведенных ниже выражений может соответствовать закону сохранения механической энергии?
  - А)  $A_{тр} = mgh_2 - mgh_1$ .
  - Б)  $A_{тр} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$ .
  - В)  $\vec{F}\Delta t = m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1$ .
  - Г)  $mgh = \frac{mv^2}{2}$ .
- На рис. 288 представлена траектория движения тела, брошенного под углом к горизонту. В какой точке траектории сумма кинетической и потенциальной энергий тела имела максимальное значение?

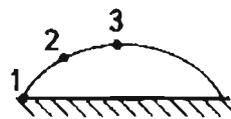


Рис. 288

- А) 1.
- Б) 2.
- В) 3.
- Г) Во всех точках одинаковое.

3. Снаряд из пружинного пистолета, расположенного на высоте  $h$  над поверхностью Земли, вылетает с одинаковой по модулю скоростью: первый раз горизонтально, второй раз вертикально вверх, третий раз вертикально вниз. В каком случае скорость снаряда при подлете к поверхности Земли будет больше? Сопротивление воздуха пренебрежимо мало.

- А) В первом.  
 Б) Во втором.  
 В) В третьем.  
 Г) Во всех случаях конечная скорость по модулю будет одинакова.

4. Тело свободно падает с высоты  $h$ . Какую скорость оно будет иметь в тот момент времени, когда его кинетическая энергия равна потенциальной?

- А)  $\sqrt{\frac{gh}{2}}$ .       Б)  $\sqrt{gh}$ .  
 В)  $\sqrt{2gh}$ .       Г)  $\sqrt{4gh}$ .

5. Лыжник спускается с горы за  $t$  минут. За какое время он спустится с горы такой же формы, но в 4 раза больших размеров?

- А)  $\frac{t}{2}$ .       Б)  $t$ .  
 В)  $2t$ .       Г)  $4t$ .

6. Шар прикреплен на легкой нерастяжимой нити длиной  $L$  к горизонтальной оси вращения (рис. 289). Какую минимальную по модулю горизонтальную скорость  $\vec{v}$  надо сообщить шару для совершения полного оборота вокруг горизонтальной оси?

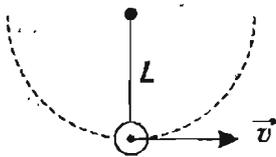


Рис. 289

- А)  $\sqrt{2gL}$ .       Б)  $\sqrt{3gL}$ .  
 В)  $2\sqrt{gL}$ .       Г)  $\sqrt{5gL}$ .

7. Всегда ли выполняются законы сохранения импульса и энергии в замкнутых системах тел? Системы отсчета считать инерциальными.

- А) Всегда.  
 Б) Никогда.  
 В) Закон сохранения импульса выполняется, закон сохранения энергии может не выполняться.  
 Г) Закон сохранения энергии выполняется, закон сохранения импульса может не выполняться.

8. Шар массой  $m$ , движущийся со скоростью  $v$ , сталкивается с неподвижным шаром той же массы. Чему равна кинетическая энергия первого шара после центрального неупругого столкновения, после которого тела движутся как единое целое?

- А)  $\frac{mv^2}{8}$ .       Б)  $\frac{mv^2}{4}$ .  
 В)  $\frac{mv^3}{2}$ .       Г) 0.

9. Шар массой  $m$ , движущийся со скоростью  $v$ , сталкивается с неподвижным шаром той же массы. Чему равна кинетическая энергия второго шара после центрального упругого столкновения, при котором сохраняется механическая энергия?

- А)  $\frac{mv^2}{8}$ .       Б)  $\frac{mv^2}{4}$ .  
 В)  $\frac{mv^2}{2}$ .       Г) 0.

10. Пуля массой  $m$ , летящая со скоростью  $v$  относительно Земли, попадает в платформу с песком массой  $M \gg m$ , движущуюся со скоростью  $u$  в том же направлении, и застревает в песке. Какова, примерно, потеря механической энергии при таком столкновении пули и платформы?

- А)  $\frac{mv^2}{2}$ .       Б)  $\frac{mu^2}{2}$ .  
 В)  $\frac{m(v-u)^2}{2}$ .       Г)  $\frac{m(v^2-u^2)}{2}$ .

11. Шар массой  $m$ , движущийся со скоростью  $v$ , сталкивается с неподвижным шаром той же массы. Чему равен угол между скоростями шаров после нецентрального упругого столкновения, при котором сохраняется механическая энергия?

- А)  $30^\circ$ .       Б)  $45^\circ$ .  
 В)  $60^\circ$ .       Г)  $90^\circ$ .

12. Шар массой  $m$ , движущийся со скоростью  $v$ , упруго сталкивается с неподвижным шаром массы  $2m$ . Каково максимально возможное значение угла между направлением вектора скорости первого шара до и после удара?

- А)  $30^\circ$ .       Б)  $60^\circ$ .  
 В)  $90^\circ$ .       Г) Угол может быть любым.

**Вариант 2**

1. Какое из приведенных ниже выражений может соответствовать закону сохранения механической энергии?

- А)  $A_{\text{тр}} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$ .  
 Б)  $A_{\text{тр}} = mgh_2 - mgh_1$ .  
 В)  $\frac{kx^2}{2} = \frac{mv^2}{2}$ .  
 Г)  $\vec{F}\Delta t = m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1$ .

2. На рис. 290 представлена траектория движения тела, брошенного под углом к горизонту. В какой точке траектории сумма кинетической и потенциальной энергий тела имела минимальное значение?

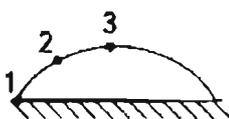


Рис. 290

- А) 1.       Б) 2.  
 В) 3.       Г) Во всех точках одинаковое.

3. Снаряд из пружинного пистолета, расположенного на высоте  $h$  над поверхностью Земли, вы-

летает с одинаковой по модулю скоростью: первый раз под углом  $30^\circ$  к горизонту, второй раз под углом  $60^\circ$  к горизонту, а третий раз горизонтально. В каком случае скорость снаряда при подлете к поверхности Земли будет меньше?

- А) Во всех случаях конечная скорость по модулю будет одинакова.  
 Б) В первом.  
 В) Во втором.  
 Г) В третьем.

4. Телу сообщили скорость  $v_0$ , направленную вертикально вверх. На какой высоте кинетическая и потенциальная энергии тела будут равны?

- А)  $\frac{v_0^2}{8g}$ .       Б)  $\frac{v_0^2}{4g}$ .  
 В)  $\frac{v_0^2}{2g}$ .       Г)  $\frac{v_0^2}{g}$ .

5. Лыжник спускается с горы за  $t$  минут. За какое время он спустится с горы такой же формы, но в 4 раза меньших размеров?

- А)  $\frac{t}{4}$ .       Б)  $\frac{t}{2}$ .  
 В)  $t$ .       Г)  $2t$ .

6. Шар массой  $m$  вращается на легкой нерастяжимой нити длиной  $l$  в вертикальной плоскости. Чему равна минимальная сила, которую должна выдержать при этом нить, чтобы она не оборвалась?

- А)  $3mg$ .       Б)  $4mg$ .  
 В)  $5mg$ .       Г)  $6mg$ .

7. Выполняются ли строго законы сохранения импульса и энергии в системе отсчета, связанной с поверхностью Земли, вращающейся вокруг своей оси?

- А) Оба закона выполняются.  
 Б) Оба закона строго не выполняются.  
 В) Закон сохранения импульса выполняется, закон сохранения энергии не выполняется.  
 Г) Закон сохранения энергии выполняется, закон сохранения импульса не выполняется.

8. Шар массой  $m$ , движущийся со скоростью  $v$ , сталкивается с неподвижным шаром той же массы. Чему равна суммарная кинетическая энергия обоих шаров после центрального неупругого столкновения?

А)  $\frac{mv^2}{8}$        Б)  $\frac{mv^2}{4}$

В)  $\frac{mv^2}{2}$        Г) 0.

9. Шар массой  $m$ , движущийся со скоростью  $v$ , сталкивается с неподвижным шаром той же массы. Чему равна кинетическая энергия первого шара после центрального упругого столкновения, при котором сохраняется механическая энергия?

А)  $\frac{mv^2}{8}$        Б)  $\frac{mv^2}{4}$

В)  $\frac{mv^2}{2}$        Г) 0.

10. Пуля массой  $m$ , летящая со скоростью  $v$  относительно Земли, попадает в платформу с песком массой  $M \gg m$ , движущуюся со скоростью  $u$  в противоположном направлении, и застревает в песке. Какова, примерно, потеря механической энергии при таком столкновении пули и платформы?

А)  $\frac{mv^2}{2}$        Б)  $\frac{mu^2}{2}$

В)  $\frac{m(v+u)^2}{2}$        Г)  $\frac{m(v^2-u^2)}{2}$

11. Шар массой  $m$ , движущийся со скоростью  $v$ , сталкивается с неподвижным шаром той же массы. Чему равен угол между скоростями шаров после нецентрального упругого столкновения, при котором сохраняется механическая энергия?

А)  $90^\circ$        Б)  $45^\circ$

В)  $60^\circ$        Г)  $30^\circ$

12. Пуля массой  $m$ , летящая горизонтально, попадает в ящик с песком массой  $M$  ( $M \gg m$ ), подвешенный на нерастяжимом и легком тросике, и застревает в нем. После попадания пули ящик отклоняется так, что его центр масс поднимается на высоту  $h$ . Чему равна начальная скорость пули?

А)  $\sqrt{\frac{2ghM}{m}}$

Б)  $\sqrt{\frac{2(M+m)ghM}{m}}$

В)  $\frac{m+M}{m} \sqrt{2gh}$

Г)  $\frac{m}{M+m} \sqrt{2gh}$

### Контрольная работа повышенного уровня сложности

#### Вариант 1

1. На чашку пружинных весов падает груз массой  $m = 1$  кг с высоты  $h = 10$  см. Каковы показания весов в момент удара? Известно, что под действием этого груза после успокоения качаний чашка

весов опускается на  $x_1 = 0,5$  см ( $g = 10 \frac{M}{c^2}$ ).

2. Камень массой 2 кг упал с некоторой высоты за время  $t = 3$  с. Чему равна кинетическая энергия камня в средней точке его пути? Чему равны скорость и кинетическая энергия камня в этой точке?

3. Камень массой  $m = 2$  кг бросили горизонтально со скоростью  $v_0 = 20 \frac{M}{c}$ . Чему равна кинетическая энергия камня в конце третьей секунды его движения?

4. На ступеньке высотой  $h = 1$  м над горизонтальной поверхностью находится шар массой  $m$  (рис. 291). Тело, масса  $M$  которого много боль-

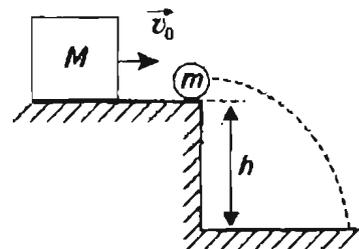


Рис. 291

ше массы  $m$ , налетает на шар со скоростью  $v_0 = 5 \frac{M}{c}$  и сталкивает его со ступеньки. Опреде-

лите скорость шара в конечный момент его падения. Столкновение считайте упругим

$$(g = 10 \frac{M}{c^2}).$$

**Вариант 2**

1. Шар массой  $m$ , находящийся на высоте  $h = 2,45$  м над массивной плитой ( $M_{пл} \gg m$ ), начинает падать на стальную плиту, равномерно поднимающуюся со скоростью  $u = 1,5 \frac{M}{c}$ . Чему равна высота  $H$  подъема шара после упругого столкновения с плитой? Ускорение свободного падения примите равным  $10 \frac{M}{c^2}$ .
2. Два шара с массами  $m$  и  $M$  ( $m \ll M$ ) начинают одновременно падать с высоты  $h$  на стальную плиту. На какую высоту  $H$  подскочит маленький шар после абсолютно упругого столкновения с плитой? Расстояние между шарами много меньше высоты  $h$ .
3. Космическая ракета обращается по круговой орбите на расстоянии  $R = 4 \cdot 10^7$  м от центра Земли в плоскости земной орбиты. Найдите минимальное значение изменения скорости ракеты  $\Delta v$ , которое может быть достаточным для вылета ее с этой орбиты за пределы Солнечной система.
4. Шар массой  $m_1 = 0,4$  кг, летящий горизонтально со скоростью  $v_1 = 10 \frac{M}{c}$ , попадает в клин массой  $m_2 = 2$  кг, лежащий на гладкой горизонтальной поверхности (рис. 292, а). Скорость шара после упругого столкновения  $\vec{v}_2$  направлена вертикально вверх (рис. 292, б). Определите скорость клина  $\vec{u}$  и скорость шара  $\vec{v}_2$  после взаимодействия. Трением пренебрегите.

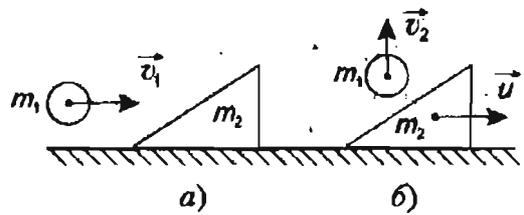


Рис. 292

*Творческие задания*

Цель: исследование преобразования энергии при действии силы упругости и тяжести.

Соберите экспериментальную установку в соответствии с рис. 293.

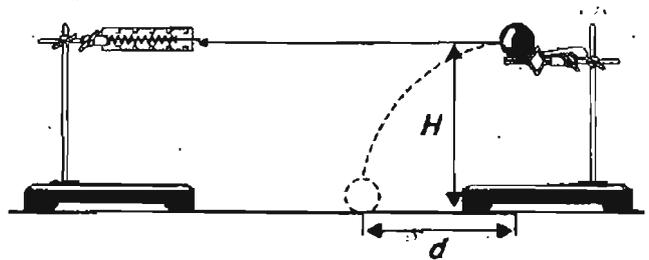


Рис. 293

В лапке штатива закрепляют горизонтально динамометр. К его крючку привязывают шар на нити длиной 60–80 см. На другом штативе закрепляют лапку. Установив шар на краю лапки, штатив вместе с шаром отодвигают от первого штатива на такое расстояние, чтобы на шар действовала сила упругости  $F_{упр}$  со стороны пружины динамометра, деформация которой равна  $x$ . Затем шар отпускают.

Докажите, что деформация пружины  $x$ , высота  $H$  и дальность полета  $d$  связаны соотношением:

$$kx^2 = \frac{d^2 mg}{2H}, \text{ где } k \text{ — жесткость пружины, } m \text{ — масса шарика. Проверьте экспериментально теоретическое предсказание.}$$



# Механические колебания и волны

## Изучив эту тему,

- вы узнаете, как с использованием маятника измерить ускорение свободного падения и оценить массу Земли, что звук — это волны, от чего зависит громкость и высота звука, что такое тембр;
- поймете, что одни и те же математические уравнения часто описывают разные явления, что есть универсальные признаки волнового движения и что энергия и импульс могут передаваться без перемещения вещества;
- научитесь анализировать колебания, определять период, частоту, решать графические задачи, измерять ускорение свободного падения, анализировать вынужденные и свободные колебания с энергетических позиций

## Основные понятия:

Период гармонических колебаний • Фаза гармонических колебаний • Частота гармонических колебаний • Свободные колебания • Вынужденные колебания • Автоколебания • Резонанс • Волны • Скорость волны • Звуковые волны • Дифракция • Интерференция • Дисперсия волн • Эффект Доплера

## 1. ВВЕДЕНИЕ

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

Нет такой области техники, нет такого раздела физики, где бы мы ни встретились в той или иной степени с явлениями, в которых имеют место колебания и волны. Радиотехника, электроника перемен-

ных токов и некоторые другие отрасли техники целиком основаны на исследованиях колебательных процессов. Во многих разделах: оптике, акустике, механике, электричестве, в теории атома, — всюду мы встречаемся с колебаниями и волнами.

В основе колебательных процессов тока в электрической цепи лежат совершенно разные явления.

То же можно сказать о звуковых и световых волнах — они различны по своей природе. Детальный анализ колебательных и волновых процессов, встречающихся в физике и технике, показывает, что *основные законы колебаний и волн во всех случаях одинаковы*. Такая универсальность законов колебательных и волновых процессов позволяет выделить изучение их в отдельный раздел, который и носит название — *теория колебаний и волн*.

Одна из особенностей колебаний связана с тем, что колебательные движения занимают ограниченную область пространства.

Именно с этим свойством колебаний связано понятие *амплитуды*. Амплитуда — это наибольшее значение колеблющейся величины.

Эта особенность колебательного движения приводит к изменению постановки вопроса об основной задаче механики (или основной задаче изучения процесса). Эта задача, как вам известно, состоит в том, чтобы узнать (предсказать) положение тела (значение величины) в любой момент времени. В теории колебаний такая постановка вопроса мало информативна. Так как, всегда можно гарантировать, что тело находится в области, ограниченной амплитудой (или величина, характеризующая процесс, не превосходит амплитуды).

Теория колебаний изучает, главным образом, общий характер процесса, взятого в целом, за большое время.

Например, камертон издает звук «ля». Этот звук не определяется положением или скоростью движения ножек камертона в данный момент. Ощущение звука «ля» возникает потому, что ножки камертона делают 440 колебаний в секунду (рис. 294). Говорят, что частота колебаний равна 440

герц:  $440 \text{ Гц} = 440 \frac{\text{кол}}{\text{с}} = 440 \frac{1}{\text{с}}$ . Время одного колебания  $T = \frac{1}{440} (\text{с}) = \frac{1}{\nu}$  — это период колебания.

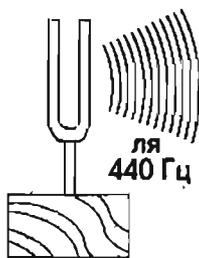


Рис. 294

На схеме, представленной на рис. 295, показана классификация колебаний по способу их возбуждения. Понятно, что на схеме представлены только те типы колебаний, которые мы будем рассматривать в той или иной мере.



Рис. 295

Из схемы видно, что выделены три основания классификации. Первое из них связано с тем, как поступает *энергия* в колебательную систему.

Если энергия поступает в систему лишь однажды, а затем система ведет себя «свободно» от источника энергии, то такие колебания называются *свободными* (рис. 296). Подвесим груз к нити и отведем нить от вертикали. Мы сообщили грузу энергию. Отпустим груз. Он будет совершать свободные колебания.

Пусть имеется источник энергии, который обеспечивает непрерывный поток энергии в колебательную систему. Чтобы такой поток энергии создать, источник должен действовать на колебательную систему с периодической силой. В этом случае колебания называются *вынужденными*. Представьте себе, что вы раскачиваете друга на качелях. Качели совершают вынужденные колебания.

В третьем случае колебательная система I сама, через систему так называемой обратной связи II, регулирует III поступающий в нее поток энергии. Речь



Рис. 296

идет об автоколебательной системе (рис. 296). Примером автоколебательной системы могут служить часы или сердце человека.

К механическим колебаниям отнесены колебания тел: грузов на пружине, грузов на нити, автомобилей на рессорах и др.

Представим себе, что на гвоздике висит молоточек для камертона (рис. 297). Отведем его в сторону и отпустим. Мы наблюдаем *механические* колебания — колебания физического тела. Вот молоточек ударил по ножке камертона. Сначала возникли колебания камертона. Разные точки его колеблются по-разному. С максимальной амплитудой колеблются концы ножек и его основание. Колебания камертона передаются ящику, и возбуждается воздух в ящике. В чем же разница между колеба-

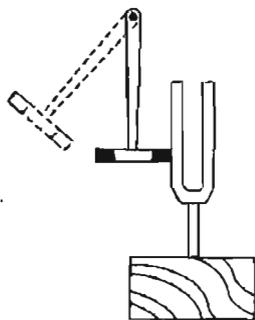


Рис. 297

ниями молоточка на гвозде и колебаниями камертона и воздуха?

Во-первых, эта разница в так называемом числе степеней свободы. Для описания колебания молоточка на гвозде достаточно знать, как изменяется угол  $\varphi$ . Говорят об одной степени свободы. А камертон и воздух в ящике? Число степеней свободы здесь велико.

Во вторых, как только молоточек ударил по камертону, мы услышали *звук*: от камертона в воздух распространяется волна. Скорость звука в воздухе около  $330 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Скорость звука в веществе и дает критерий, по которому можно определить, какие колебания относятся к механическим, а какие нет.

Найдем время распространения звука в теле, размер которого  $L$ . Это время равно  $\frac{L}{u} = t_0$ . Если  $t_0 \ll T$ , где  $T$  — период колебаний, то речь идет о колебаниях тел; если  $t_0 \sim T$ , то такие колебания называются *акустическими*. Конечно, между механическими и акустическими колебаниями много общего, их разделение условно. Но в таком разделении есть и глубокий смысл.

Важно отличать колебания материального объекта от колебаний физических величин, характеризующих колебательный процесс, происходящий этим объектом. Например, колеблется молоток и гвозде, но при этом периодически изменяется и угловая скорость движения молотка.

Важную информацию о процессе в целом дает вид функции, описывающей процесс во времени  $x = f(t)$ . Именно характер этой функции и позволяет разделить колебания на два типа. Если функция  $x = f(t)$  периодическая, то и колебания называются *периодическими* (рис. 298). В этом случае существует такой минимальный промежуток времени  $T$ , что  $f(T + t) = f(t)$ . Этот промежуток времени и есть *период*. Число колебаний за 1 с мы уже

назвали *частотой*  $\nu$ :  $\nu = \frac{1}{T}$ . Одно из необычных

свойств колебаний — это часто наблюдаемая зависимость периода от амплитуды. Это свойство позволяет ввести так называемые условно-периодические колебания.

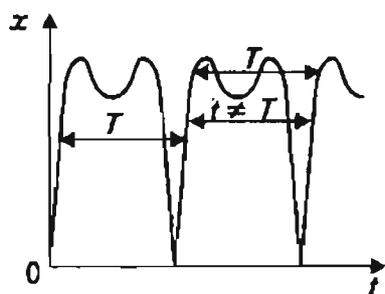


Рис. 298

**Затухающие колебания**

Рассмотрим затухающие колебания (рис. 299). В строгом смысле слова, эти колебания нельзя отнести к периодическим: они не повторяются в точности через время  $T$  – амплитуда их убывает.

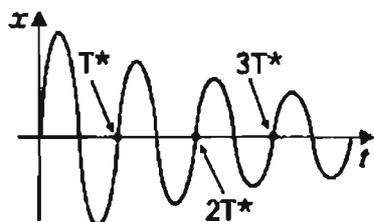


Рис. 299

Однако время одного колебания  $T^*$  остается неизменным. Поэтому и можно говорить об условном периоде. Колебания считаются *незатухающими*, то есть периодическими, в строгом смысле, пока амплитуда не уменьшится примерно на 20%.

Представим себе, что механическое устройство (рис. 300, а) заставляет колебаться небольшую пробку (I). При этом создаются волны постоянной амплитуды (высоты) сколь угодно продолжительное время. Правее мы видим пробковый поплавок (II) на поверхности воды. Когда волны проходят мимо него, он раскачивается точно в том же ритме, в каком работает создающее волны устройство. Поэтому колебания поплавка можно считать мерой возмущения, искажающего первоначально гладкую поверхность воды; высоту же, на которую

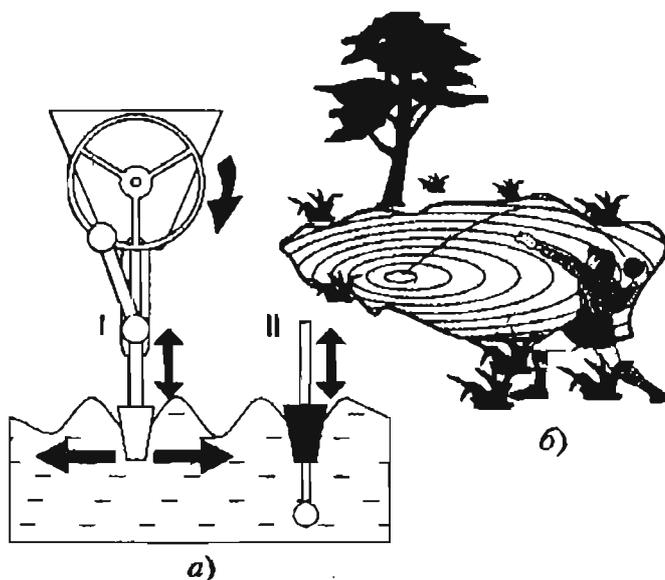


Рис. 300

в своем движении поднимается поплавок, можно рассматривать как амплитуду этого возмущения.

Этот мысленный опыт показывает, что при волновом движении не происходит переноса вещества, а распространяются колебания частиц воды, которые приводят в движение поплавок (рис. 300, б). Для того чтобы поплавок двигался, ему нужно сообщить энергию. Следовательно, при распространении волн происходит передача энергии (без переноса вещества).

Энергия, переносимая волной, равна сумме кинетической энергии колеблющихся частиц и потенциальной энергии упругой деформации среды. Энергия, которую несет с собой волна, распространяется вместе с волной в том же направлении.

Интересным свойством волнового движения является то, что волна может переносить энергию на большие расстояния с малыми потерями.

Волны доносят энергию Солнца до Земли. Мы, в свою очередь, можем посылать радиоволны не только в пределах Земли, но и на космические корабли, поддерживая с ними связь.

## 2. ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

**Гармонические колебания** – частный случай периодических колебаний. Гармонические колебания – это такие колебания, при которых зависимость колеблющейся величины от времени выражается гармонической функцией, имеющей следующую структуру:  $x = f(t) = \text{const} \cdot \sin(\varphi)$ , где «const» (перед знаком синуса) – постоянное число, а под знаком синуса – линейная функция времени.

Итак, колебания являются гармоническими, если:

$$x = A \cdot \sin(b \cdot t + c).$$

Величины  $A, b, c, \varphi = b \cdot t + c$  – характеристики гармонического колебания. Выясним их физический смысл.

Амплитуда  $A$  – это наибольшее (по модулю) отклонение тела от положения равновесия, так как  $\sin(b \cdot t + c) \leq 1$ . Эта величина называется **амплитудой**. Амплитуда иногда обозначается  $X_{\max}$  или  $X_m$ . Измеряется в единицах той величины, которая совершает колебания.

Линейная функция  $\varphi = b \cdot t + c$  (рис. 301), находящаяся под знаком синуса, называется **фазой колебаний**. Обратим внимание: вы впервые встречаетесь с характеристикой движения, которая является не постоянной величиной, а функцией.

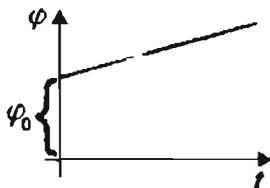


Рис. 301

Таким образом, фаза колебаний – это характеристика, имеющая разное значение в разный момент времени. Измеряется в радианах. Значение  $\varphi$  в начальный момент времени равно:  $\varphi_{t=0} = b \cdot 0 + c = c$ . И называется **начальной фазой**.

Начальная фаза чаще обозначается  $\varphi_0$ . Теперь легко выяснить смысл постоянной  $b$ . Найдем:

$$b = \frac{\varphi - \varphi_0}{t} \left[ \frac{\text{рад}}{\text{с}} = \frac{1}{\text{с}} \right].$$

Смысл величины  $b$  состоит в том, что она показывает изменение фазы в 1 с; другими словами: величина « $b$ » – скорость изменения фазы. В физической литературе константа « $b$ » обозначается  $\omega$  (омега) и называется **циклической частотой**.

Итак, фаза обычно обозначается:  $\varphi = \omega \cdot t + \varphi_0$ .

Почему  $\omega$  называется **циклической частотой**? В частности, потому что она связана с частотой  $\nu$ .

Действительно, функция  $\sin \varphi$  имеет период  $2\pi$  радиан. Другими словами, через  $\omega t = 2\pi \text{ рад}$  значение функции повторяется. Происходит это через время, равное периоду  $T$ . Ясно, что  $t = T = \frac{2\pi}{\omega}$ .

Отсюда,  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$ . Таким образом, если  $\nu$  показывает число колебаний за 1 с, то циклическая частота показывает число колебаний за  $2\pi$  с, т. е. приблизительно за 6,28 с.

Итак, гармонические колебания – это изменения, происходящие в соответствии с законом:

$$x = X_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_{01}).$$

Этот закон можно записать в форме:

$$x = X_m \cdot \cos(\omega t + \varphi_{02}).$$

### Геометрическая модель гармонических колебаний

Представим себе тело небольших размеров, которое с постоянной по модулю скоростью вращается по окружности, радиус которой значительно больше размеров тела: обычно говорят: «материальная точка обращается по окружности радиуса  $R$ ». Рассматриваемое вращение, хотя и является периодическим движением, не относится к колебаниям.

Однако проследим за движением проекции вращающейся точки на любой из диаметров, например, вертикальный или горизонтальный. Проекция совершает колебания.

Это связано с тем, что положение проекции равномерно вращающейся точки находится при помощи функции «синус» или «косинус». Действительно, из треугольника (рис. 302) видно, что:

$$x = X_m \cos \varphi = X_m \cos \left( \frac{2\pi}{T} t \right)$$

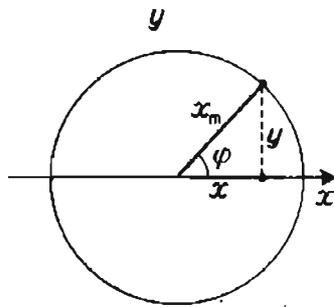


Рис. 302

$$y = X_m \sin \varphi = X_m \sin \left( \frac{2\pi}{T} t \right)$$

В чем же сущность геометрической модели гармонических колебаний? Ее можно выразить следующим образом.

Если точка вращается равномерно по окружности радиуса  $R$  с угловой скоростью  $\omega$ , то проекция ее на любой из диаметров совершает гармоническое колебание с амплитудой, равной радиусу, с периодом  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ , частотой  $\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$ .

Если величина  $X$  колеблется гармонически с амплитудой  $X_m$  и периодом  $T$ , то моделью этого колебания является колебание проекции точки на любой из диаметров окружности.

Радиус этой окружности равен амплитуде колебаний, а угловая скорость вращения точки равна  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ .

### Условия возникновения гармонических колебаний (уровень Б)

Обратимся к геометрической модели гармонических колебаний. В любой момент времени модуль координаты равен:

$$|x| = X_m \cos \alpha, \tag{1}$$

а модуль силы в этот же момент времени:

$$|F| = m\omega^2 X_m \cos \alpha. \tag{2}$$

Сравним формулы (1) и (2). Поделим значение силы на координату:

$$\frac{|F|}{|x|} = m\omega^2; \quad \frac{|F_1|}{|x_1|} = \frac{|F_2|}{|x_2|} = \dots$$

Оказалось, что отношение модуля силы к модулю координаты есть постоянное число, не зависящее от времени. Конечно, следует учесть направление силы в любой момент времени. Сила и координата всегда противоположны по направлению (рис. 303, а, б).

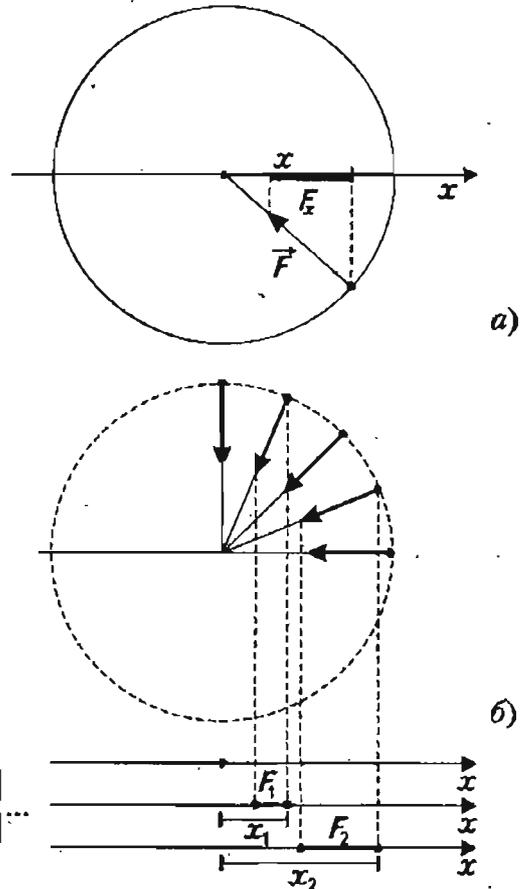


Рис. 303

Итак, можно сформулировать следующее условие гармонических колебаний: для возникновения гармонических колебаний необходимо, чтобы выполнялось соотношение  $F_x = -kx$ .

Коэффициент пропорциональности между силой и координатой однозначно определяет период гармонических колебаний:  $k = m\omega^2$ .

Следовательно:  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ .

Так как  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ , то  $\frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{k}{m}}$ .

Таким образом:  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ .

а частота  $\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ .

Существуют три способа графического представления колебаний. **Первый способ:** график зависимости колеблющейся величины от времени (рис. 304). Вам необходимо уметь, во-первых, «читать» графики колебаний. Под этим подразумевается умение определять по графику  $T, \nu, \omega, \varphi_0, X_m$ . Более сложное умение – это сравнивать несколько колебаний по их графикам. Во-вторых, необходимо уметь строить графики по их аналитической записи; это значительно сложнее, чем читать графики.

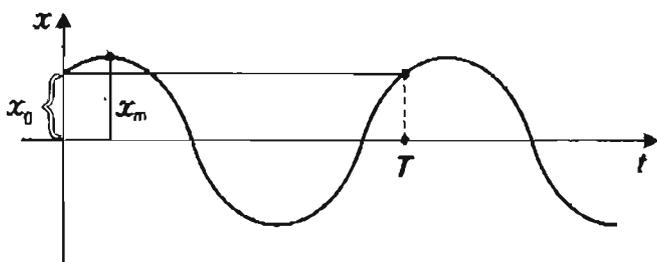


Рис. 304

**Второй способ** графического изображения гармонических колебаний следует из геометрического моделирования гармонического колебания при помощи вращающейся по окружности точки (рис. 305). На основе этой модели разработан метод (способ) векторных диаграмм. В соответствии с ним гармоническое колебание изображается вектором, длина которого равна  $X_m$  и который образует с осью  $Ox$  угол, равный начальной фазе  $\varphi_0$ . Ваше воображение должно быть достаточно развито, чтобы уметь представить себе, как вектор  $\vec{X}_m$  вращается с угловой скоростью  $\omega$ , а проекция конца этого вектора на ось  $Ox$  совершает гармонические колебания.

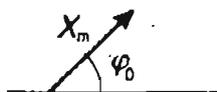


Рис. 305

**Третий способ** графического изображения гармонических колебаний называется **спектральным** (рис. 306). На числовой оси отмечаются частоты колебаний. Тогда гармоническое колебание изображается отрезком, расположенным перпендику-

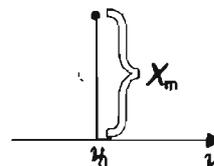


Рис. 306

лярно оси частот. Длина его равна амплитуде колебаний, а основание отрезка совпадает с частотой

### Гармонические колебания – это очень важная модель, позволяющая изучать колебания громадного числа физических систем

Гармоническое колебание  $x = X_m \sin(\omega t + \varphi_{02})$  – это идеальный процесс, бесконечный по времени. Однако если время наблюдения  $t$  много больше  $T$ , т. е. за время процесса совершается достаточно большое число колебаний, то в этот промежуток времени колебания являются гармоническими или условно-гармоническими.

Гармонически может изменяться координата тела (механические колебания), давление воздуха около камертона (акустические колебания), напряжение или сила тока в электрической цепи (электрические колебания), напряженность поля в световой или радиоволне (электромагнитные колебания).

Важность изучения гармонических колебаний определяется еще и тем, что любые периодические колебания могут быть представлены суммой определенного (конечного) числа гармонических колебаний.

Рисунок 307, а, б иллюстрирует сказанное. Периодический процесс, изображенный на рисунке сплошной линией, можно представить в виде суммы двух гармоник. Первая гармоника имеет амплитуду в два раза больше второй. Период первой гармоники также в два раза больше периода второй.

Гармонический состав сложного периодического процесса называется его спектром.

### Упругие колебания

Вы знаете, что сила упругости подчиняется закону Гука:  $F_x = -kx$ , где  $k$  – жесткость образца. Отсюда следует, что при действии на тело силы упругости могут возникнуть гармонические колебания. Однако гармонические колебания возникают под

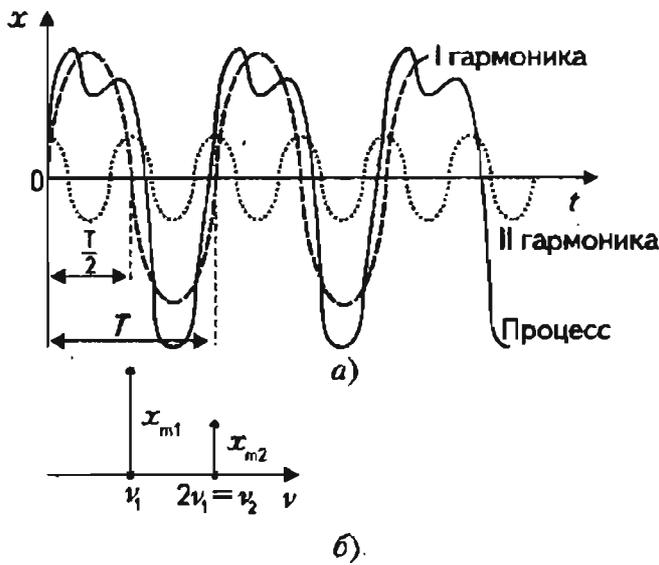


Рис. 306

действием любых по природе сил, если они подчиняются соотношению:  $F_x = -kx$ . Если они не являются упругими по своей природе, то их тогда называют квазиупругими.

Например, в качестве квазиупругой силы может служить сила всемирного тяготения.

Представим себе такую фантастическую ситуацию. Сквозь Землю сделали тоннель, проходящий через ее центр. Как будет двигаться камень массы  $m$ , брошенный в этот тоннель (рис. 308)? На расстоянии  $X$  от центра Земли на него будет действовать сила всемирного тяготения со стороны части земного шара радиусом  $X$ . Сила тяготения со стороны внешних слоев равна 0.

Можно доказать, что сила всемирного тяготения  $F_x$  со стороны части шара пропорциональна  $X$ .

Действительно,  $|F_x| = G \frac{mM_x}{X^2}$ . Масса  $M_x$  части шара радиуса  $X$  равна:  $M_x = \rho V_x = \rho \frac{4}{3} \pi X^3$ .

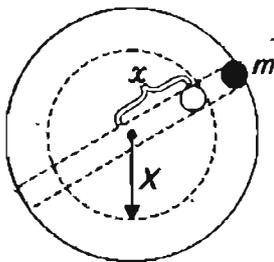


Рис. 308

Итак,  $|F_x| = G \frac{m}{X^2} \rho \frac{4}{3} \pi X^3 = \frac{4}{3} \rho G \pi m X$ .

С учетом знака для проекции можно записать:

$$|F_x| = -\frac{4}{3} \rho G \pi m X = -kx, \text{ где } k = \frac{4}{3} \rho G \pi m.$$

Именно сила  $|F_x| = -\frac{4}{3} \rho G \pi m X = -kx$  — сила тяготения — оказалась квазиупругой, и камень совершает гармонические колебания с периодом:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = \sqrt{\frac{m}{\frac{4}{3} \rho G \pi m}} = \sqrt{\frac{4\pi^2 \cdot 3}{4\rho G \pi}} = \sqrt{\frac{3\pi}{\rho G}}$$

### Ускорение гармонических колебаний (уровень В)

При гармонических колебаниях  $F_x = -kx$ . Воспользуемся вторым законом Ньютона:

$$ma_x = -kx \rightarrow a_x = -\frac{k}{m}x.$$

Это означает, что колебание не является равноускоренным движением: ускорение изменяется от 0 в положении равновесия до наибольшего значения при  $x = X_m$ . Максимальное ускорение равно:

$$a_m = -\frac{k}{m}X_m = -\omega^2 X_m.$$

Оказывается, что ускорение тела при гармонических колебаниях само изменяется по гармоническому закону. Если тело колеблется в соответствии с уравнением:  $x = X_m \sin \omega t$ , то ускорение изменяется по закону:

$$a_x = -\omega^2 x = -\omega^2 X_m \sin \omega t = -a_m \sin \omega t.$$

Соотношение  $a_x = -\omega^2 x$  позволяет сформулировать условие возникновения гармонических колебаний для немеханических систем, когда нельзя использовать понятие силы.

Пусть  $x$  — физическая величина. Тогда  $v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}$  — скорость ее изменения. Аналогом механического ускорения является быстрота изменения скорости процесса  $\frac{\Delta v_x}{\Delta t}$ .

Итак, если быстрота изменения скорости какого-либо параметра процесса пропорциональна этому параметру со знаком «-», то происходит гармонический процесс.

### Скорость при гармонических колебаниях

Как изменяется скорость тела при его гармонических колебаниях?

Для ответа на этот вопрос воспользуемся моделью гармонических колебаний. В соответствии с ней, проекция равномерно вращающейся по окружности точки совершает гармонические колебания:

$$x = X_m \cdot \sin \omega t.$$

Тогда скорость этой точки равна проекции скорости вращающейся точки:

$$v_x = v \cos \omega t = \omega X_m \cos \omega t \quad (\text{рис. 309}).$$

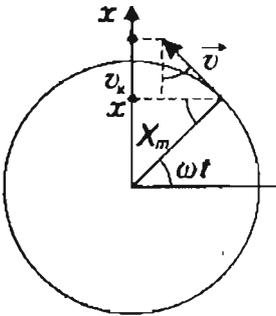


Рис. 309

### Полная механическая энергия гармонически колеблющегося тела

Она складывается из его кинетической и потенциальной энергии:

$$E = \frac{mv_x^2}{2} + \frac{kx^2}{2}.$$

Если  $x = X_m \sin \omega t$ , то  $v_x = \omega X_m \cos \omega t$ . Кинетическая энергия колеблющегося тела равна:

$$E_K = \frac{mv_x^2}{2} = \frac{m\omega^2 X_m^2 \cos^2 \omega t}{2}.$$

Воспользуемся известным соотношением:

$$\cos^2 \alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2}.$$

Тогда зависимость кинетической энергии тела от времени можно записать в виде:

$$E_K = \frac{m\omega^2 X_m^2}{4} (1 + \cos 2\omega t) = \frac{m\omega^2 X_m^2}{4} + \frac{m\omega^2 X_m^2}{4} \cos 2\omega t.$$

Это выражение состоит из двух слагаемых, первое из которых:  $\frac{m\omega^2 X_m^2}{4}$  — постоянно во времени. Вто-

рое слагаемое зависит от времени по «гармоническому закону»: частота изменений этой части кинетической энергии в 2 раза больше ( $2\omega$ ) частоты колебаний тела, а максимальное значение равно  $\frac{m\omega^2 X_m^2}{4}$ . Так как  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ , то  $\frac{m\omega^2 X_m^2}{4} = \frac{kX_m^2}{4}$ .

*Кинетическая энергия гармонически колеблющегося тела не остается постоянной, а совершает гармоническое колебание относительно среднего значения  $\frac{1}{4} kX_m^2$  с удвоенной частотой.*

Таким же свойством обладает и потенциальная энергия гармонически колеблющегося тела:

$$\begin{aligned} E_{\text{пот}} &= \frac{kx^2}{2} = \frac{k}{2} X_m^2 \sin^2 \omega t = \left( \frac{kX_m^2}{2} \right) \left( \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right) = \\ &= \frac{kX_m^2}{4} - \frac{kX_m^2}{4} \cos 2\omega t. \end{aligned}$$

Графически изменения кинетической и потенциальной энергий тела представлены на схеме 21.

При гармонических колебаниях кинетическая и потенциальная энергия тела изменяются относительно общего среднего значения  $\frac{1}{4} kX_m^2$  с удвоенной частотой и одинаковой амплитудой. Когда кинетическая энергия принимает это максимальное значение, потенциальная энергия обращается в нуль и наоборот. Однако полная энергия:  $E = E_K + E_{\text{пот}}$  остается постоянной:

$$E = \frac{kX_m^2}{4} + \frac{kX_m^2}{4} - \frac{kX_m^2}{4} \sin 2\omega t = \frac{1}{2} kA^2.$$

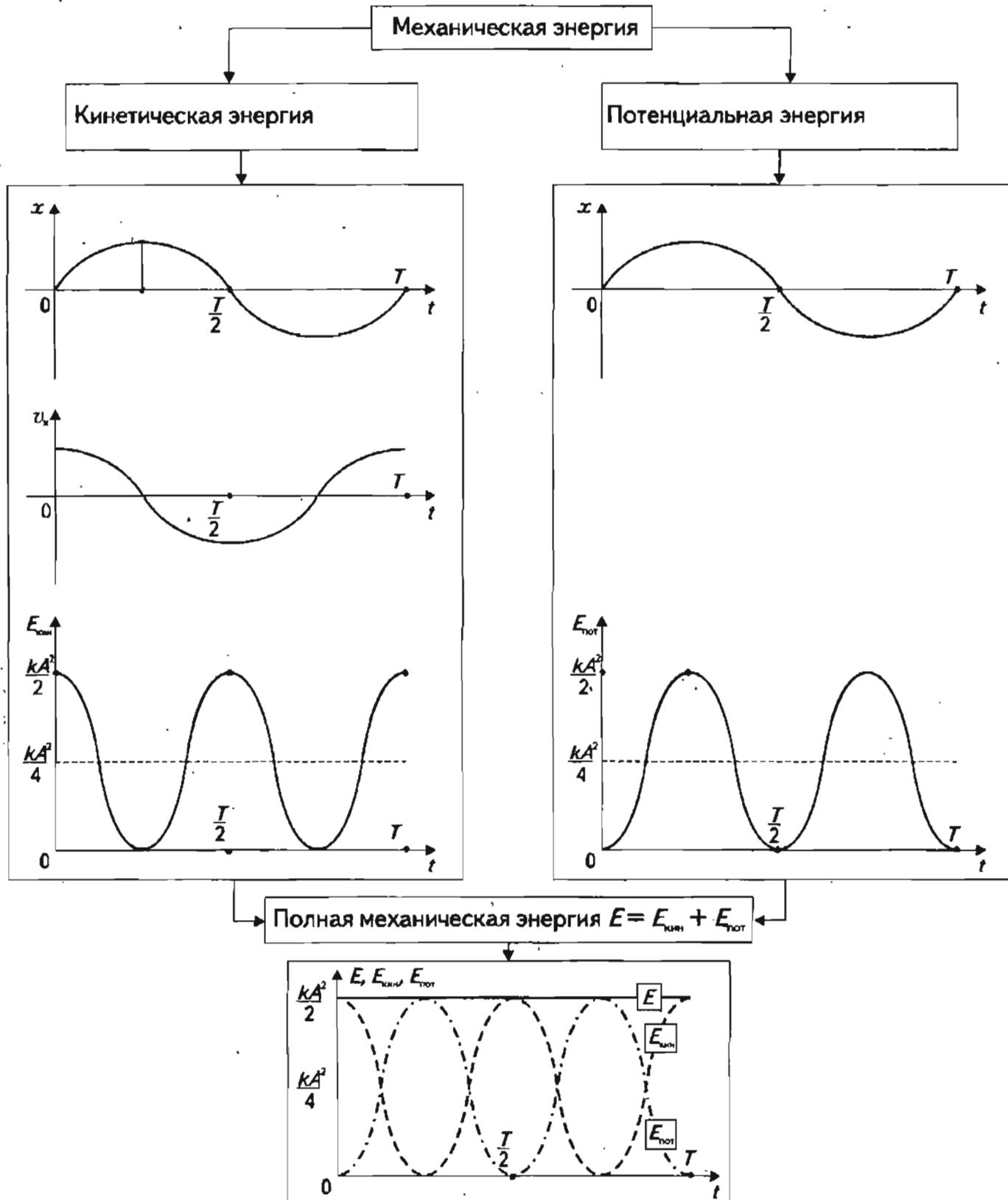
### Графики, иллюстрирующие гармонические колебания

В табл. 18 приведены графики зависимости координаты  $x(t)$ , скорости  $v_x(t)$ , ускорения  $a_x(t)$ .

Если начальная фаза колебаний не равна нулю, то при построении графика надо поступить следующим образом. Сначала строится «базовый» график в предположении, что начальная фаза равна нулю

**СХЕМА 21**

**ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ**



ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ	
$x = X_m \sin \omega t$ $x = 2 \sin 4\pi t$ $X_m = 2 \text{ см}$ $\omega = 4\pi$ $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{4\pi} = 0,5 \text{ с}$ $\nu = \frac{1}{T} = 2 \text{ Гц}$	
$v_x = X_m \omega \cos \omega t$ $v_x = 2 \cdot 4\pi \cos 4\pi t$ $v_x = 8\pi \cos 4\pi t = 25 \cos 4\pi t$ $T = \frac{2\pi}{\omega} = 0,5 \text{ с}$	
$a_x = -X_m \omega^2 \sin \omega t$ $a_x = -2(4\pi)^2 \sin 4\pi t$ $a_x = -315 \sin 4\pi t$	
$x = X_m \sin(\omega t + \varphi_0)$ $x = 2 \sin\left(\pi t - \frac{\pi}{3}\right)$ $\omega = \pi; T = \frac{2\pi}{\omega} = 2 \text{ с}$ $\varphi_0 = -\frac{\pi}{3}; \Delta t = \frac{\pi}{3 \cdot 2\pi} T = \frac{1}{6} T$	
<p>Синфазные колебания (1 и 2)</p> <p>Колебания, происходящие в противофазе (1 и 3)</p> <p>Колебания, сдвинутые по фазе на <math>\frac{\pi}{2}</math> (1 и 4)</p>	

Затем определяют сдвиг во времени  $\Delta t = \frac{\varphi_0}{2\pi} T$  и осуществляют сдвиг «базового» графика (см. четвертую строку таблицы).

В последней строке таблицы построены графики колебаний, которые совпадают по фазе (1 и 2), и графики колебаний, происходящих в противофазе (1 и 3), графики 1 и 4 представляют колебания, сдвинутые по фазе на  $\frac{\pi}{2}$ .

*Практикум по решению задач*

**Примеры решения задач**

**Пример 1**

По графику (рис. 310) найдите амплитуду, период и частоту колебаний. Запишите уравнение гармонического колебания.

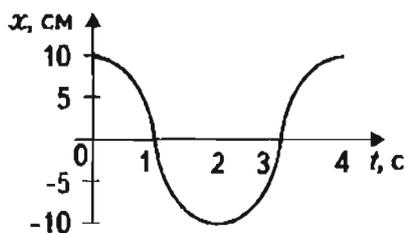


Рис. 310

**Решение**

Амплитуда колебаний равна  $x_m = 10$  см, период — 4 с, частота — 0,25 Гц.

$$x = x_m \cos 2\pi t \approx 10 \cos 0,5\pi t \text{ (см).}$$

**Пример 2**

Амплитуда колебаний равна  $x_m = 0,2$  м, период — 2 с. Запишите уравнение гармонического колебания и график этого колебания, учитывая, что в начальный момент времени координата тела была равна нулю (рис. 311).

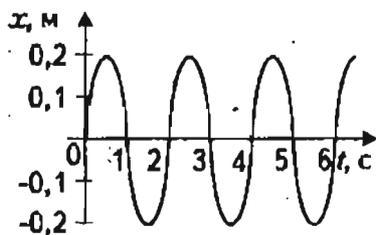


Рис. 311

**Решение**

$$x = X_m \sin \frac{2\pi}{T} t;$$

$$x = 0,2 \sin \pi t.$$

**Пример 3**

Выполните сложение гармонических колебаний, совершающихся по одной прямой и заданных уравнениями:

$$x_1 = x_0 \sin \omega t; \quad x_2 = x_0 \cos \omega t.$$

Будет ли это результирующее колебание гармоническим?

**Решение**

**А) Алгебраический способ.**

$$x_0 \sin \omega t + x_0 \cos \omega t = x_0 \left[ \sin \omega t + \sin \left( \frac{\pi}{2} + \omega t \right) \right] =$$

$$= 2x_0 \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{4} \right) \cos \frac{\pi}{4} = \sqrt{2} x_0 \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{4} \right)$$

Результат показывает, что полученное колебание является гармоническим и сдвинутым по фазе на  $\frac{\pi}{4}$  от составляющих колебаний.

**Б) Метод «векторных диаграмм».**

Так как функции  $\sin \omega t$  и  $\cos \omega t$  сдвинуты по фазе на  $\frac{\pi}{2}$ , а амплитуды соответствующих колебаний равны, то изобразим их на векторной диаграмме (рис. 312, а). Из рисунка сразу ясно, что амплитуда результирующего колебания равна  $x_{0p} = \sqrt{2} x_0$ , а сдвиг фаз между  $x_p$  и  $x_{01}$  составляет  $\frac{\pi}{4}$ .

**В) Графический способ.**

Изобразим на рисунке  $x(t)$  обе заданные функции (рис. 312, б). Результирующее колебание найдем путем сложения в каждый момент времени значений  $x_1$  и  $x_2$ .

Из рисунка видно, что результирующее колебание — гармоническое, той же частоты с амплитудой  $\sqrt{2} x_0$ , а сдвиг фаз равен  $\frac{\pi}{4}$ .

**Пример 4**

Выполните графически сложение трех совершающихся по одной прямой гармонических колебаний, заданных уравнениями:

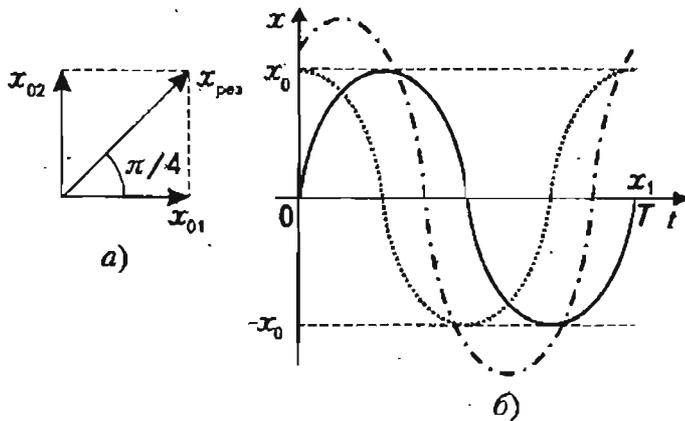


Рис. 312

$$x_1 = x_0 \sin \omega t; \quad x_2 = 0,32x_0 \sin 3\omega t; \quad x_3 = 0,21x_0 \sin 5\omega t.$$

**Решение**

Изобразим на графике (рис. 313) гармонические колебания, заданные условиями задачи. Результирующее колебание найдем путем сложения в каждый момент времени значений  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  исходя из принципа суперпозиции. На рис. 314 произведено последовательное суммирование. Как видно из этого рисунка, результирующее колебание не является гармоническим.

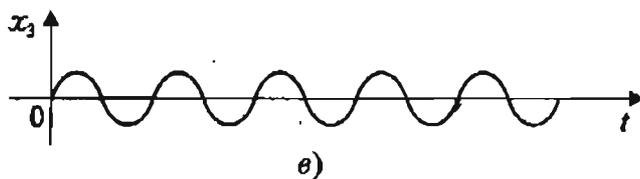
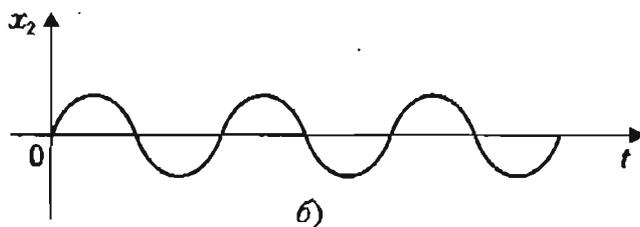
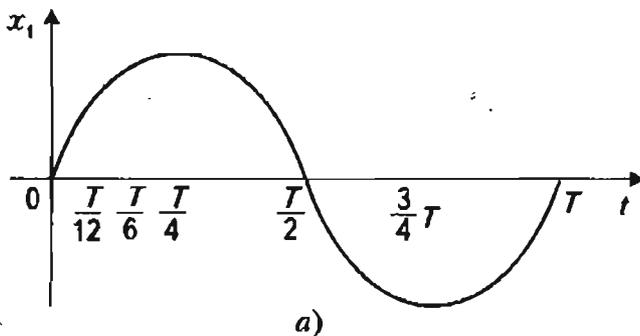


Рис. 313

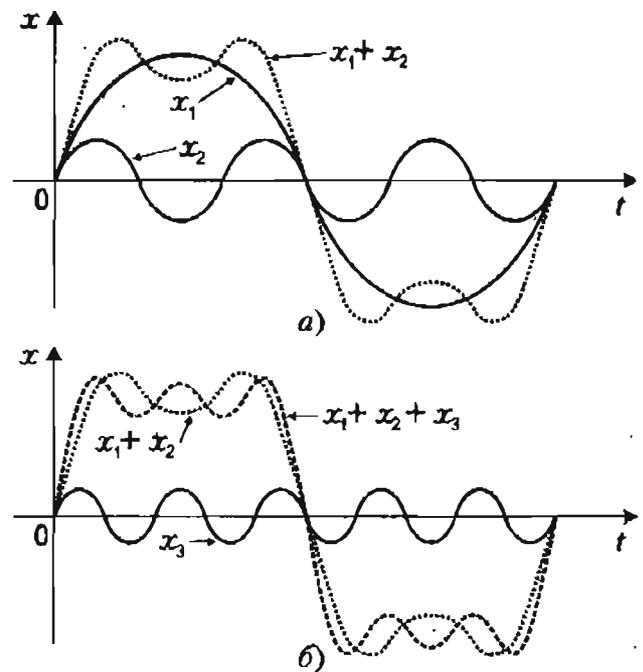


Рис. 314.

**Решить самостоятельно**

- По графику, изображенному на рис. 315, найдите амплитуду, период и частоту гармонических колебаний. Запишите уравнение гармонических колебаний.

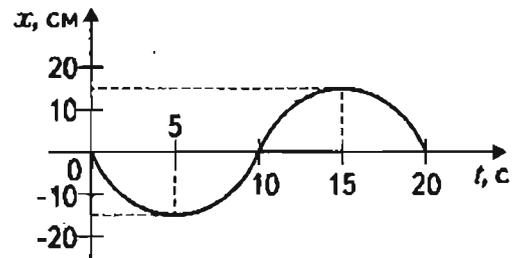


Рис. 315

- Дано уравнение гармонического колебания:

$$x = 0,5 \cos \left( 5\pi t + \frac{\pi}{4} \right) \text{ см.}$$

Чему равны амплитуда, период, частота, циклическая частота, фаза и начальная фаза колебаний?

- Тело совершает гармоническое колебание по закону:  $x = 2 \sin \left( \pi t + \frac{\pi}{6} \right)$  см. Чему равно смещение колеблющейся точки в моменты времени  $t_1 = 0$ ;  $t_2 = 0,5$ ;  $t_3 = 1$  с?

4. Амплитуда колебания тела равна 4 см, смещение 2 см. Какая доля периода прошла с момента начала колебаний, если тело совершает гармонические колебания по закону:  $x = x_m \cos \omega t$ .
5. Выполните графическое сложение двух совершающихся по одной прямой гармонических колебаний, заданных уравнениями:  
 $x_1 = x_{01} \sin \omega t$ ;  $x_2 = x_{02} \cos \omega t$ .
- Будет ли оно гармоническим?
6. Сложите три гармонических колебания одинаковой частоты и амплитуды, принимая, что эти колебания сдвинуты по фазе друг относительно друга на  $\frac{2}{3}\pi$ . Решите задачу алгебраически, графически и с помощью векторной диаграммы.

Контрольные работы

Вариант 1

1. Какое из перечисленных ниже движений является механическим колебанием?
- 1) Движение качелей.  
 2) Движение мяча, падающего на землю.
- А) Только 1.       Б) Только 2.  
 В) 1 и 2.       Г) Ни 1 ни 2.
2. Какие из перечисленных ниже колебаний являются свободными?
- 1) Колебания груза, подвешенного к пружине, после однократного его отклонения от положения равновесия.  
 2) Колебания диффузора громкоговорителя во время работы приемника.
- А) Только 1.       Б) Только 2.  
 В) 1 и 2.       Г) Ни 1 ни 2.
3. За 4 с маятник совершает 8 колебаний. Чему равен период колебаний?
- А) 8 с.       Б) 4 с.  
 В) 2 с.       Г) 0,5 с.  
 Д) 32 с.
4. По условию задачи 3 определите частоту колебаний.
- А) 8 Гц.

- Б) 4 Гц.  
 В) 2 Гц.  
 Г) 0,5 Гц.  
 Д) Среди ответов А–Г нет правильного.
5. На рис. 316 представлена зависимость координаты тела, колеблющегося вдоль оси Y, от времени. Какова амплитуда колебаний?

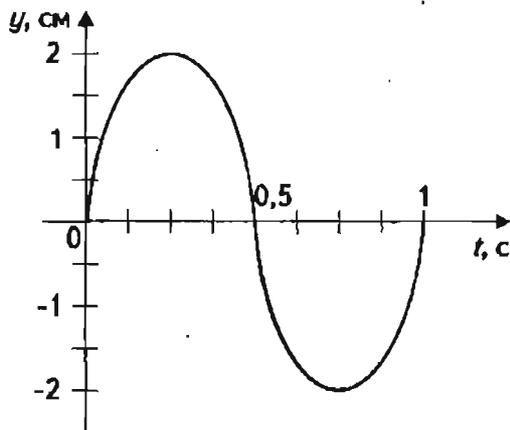


Рис. 316

- А) 4 см.       Б) 2 см.  
 В) 1 см.       Г) 0,5 см.  
 Д) 0.       Е) -2 см.
6. На рис. 317 изображен график зависимости координаты x колеблющегося тела от времени. Чему равен период колебаний?

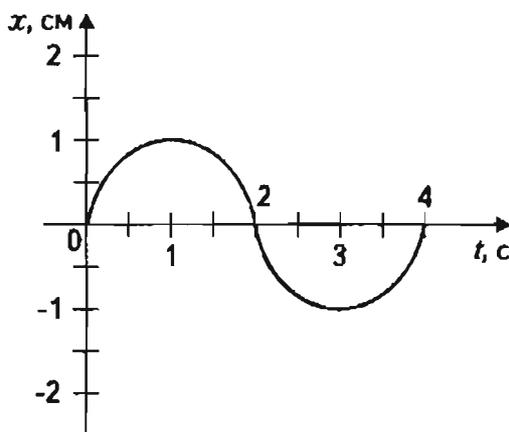


Рис. 317

- А) 1 с.       Б) 2 с.  
 В) 4 с.       Г)  $\frac{1}{2}$  Гц.  
 Д)  $\frac{1}{4}$  Гц.       Е) 1 Гц.



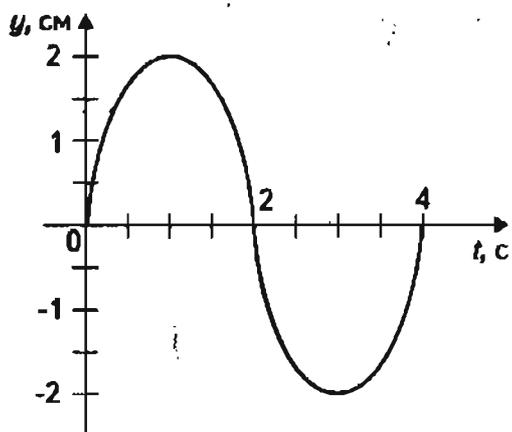


Рис. 319

6. На рис. 320 изображен график зависимости координаты  $x$  колеблющегося тела от времени. Чему равен период колебаний?

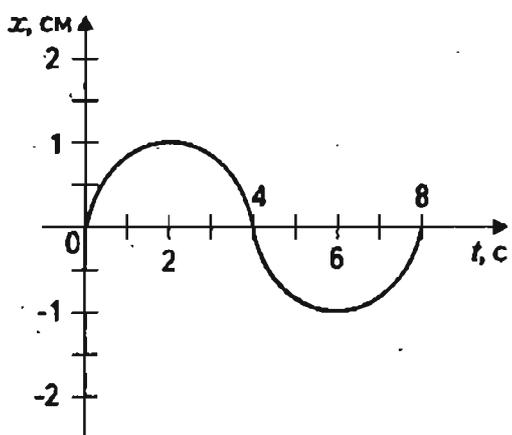


Рис. 320

- А) 2 с.
- Б) 4 с.
- В) 8 с.
- Г)  $\frac{1}{2}$  Гц.
- Д)  $\frac{1}{4}$  Гц.
- Е)  $\frac{1}{8}$  Гц.

7. По графику на рис. 320 определите частоту колебаний.

- А) 2 с.
- Б) 4 с.
- В) 8 с.
- Г)  $\frac{1}{2}$  Гц.
- Д)  $\frac{1}{4}$  Гц.
- Е)  $\frac{1}{8}$  Гц.

8. Какой из графиков изменения смещения  $x$  при механических колебаниях (рис. 321) соответствует колебанию с наибольшей амплитудой?

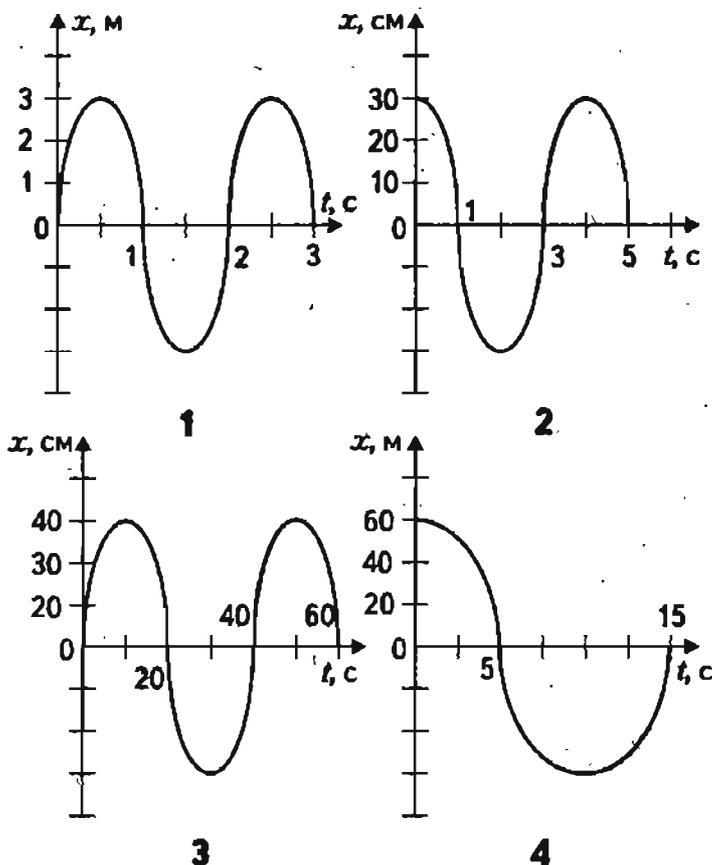


Рис. 321

- А) 1.
- Б) 2.
- В) 3.
- Г) 4.

9. Какой из графиков, представленных на рис. 321, соответствует колебанию с наименьшим периодом?

- А) 1.
- Б) 2.
- В) 3.
- Г) 4.

10. Какой из графиков, представленных на рис. 321, соответствует колебанию с наименьшей частотой?

- А) 1.
- Б) 2.
- В) 3.
- Г) 4.

### Контрольная работа повышенного уровня сложности

#### Вариант 1

1. Составьте уравнение гармонического колебания, если амплитуда колебаний  $X_m = 5$  см, а период колебания  $T = 0,5$  с.

2. Уравнение гармонического колебания имеет вид:

$$x = 2 \sin(2\pi t); ([x] = \text{см}; [t] = \text{с}).$$

Определите амплитуду колебаний, максимальные значения скорости и ускорения колеблющейся точки.

3. Зависимость проекции силы, действующей на тело массой 0,1 кг, от координаты тела имеет вид:  $F_x = -40x$  ( $[F_x] = \text{Н}; [x] = \text{м}$ ).

Определите период колебаний тела.

4. Постройте график колебаний:

$$x = 5 \sin\left(4\pi t - \frac{\pi}{4}\right) \quad ([x] = \text{см}; [t] = \text{с}).$$

#### Вариант 2

1. Составьте уравнение гармонического колебания, если амплитуда колебаний  $X_m = 3$  см, а частота колебаний  $\nu = 5$  Гц.

2. Уравнение гармонического колебания имеет вид:

$$x = 5 \cos(4\pi t), ([x] = \text{см}; [t] = \text{с}).$$

Определите амплитуду колебаний, максимальные значения скорости и ускорения колеблющейся точки.

3. Зависимость проекции ускорения колеблющегося тела от координаты тела имеет вид:

$$a_x = -400x, ([a_x] = \frac{\text{м}}{\text{с}^2}; [x] = \text{м}).$$

Определите период колебаний тела.

4. Постройте график колебаний:

$$x = 2 \sin\left(5\pi t + \frac{\pi}{3}\right) \quad ([x] = \text{см}; [t] = \text{с}).$$

### 3. СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

*Конспект.  
Таблицы. Схемы*

#### Условия возникновения свободных колебаний

Внимательный анализ простых механических систем позволяет определить условия, при которых возникают колебания.

Рассмотрим уже знакомую нам ситуацию, когда тело находится в состоянии равновесия (рис. 322). Выведем шарик из состояния равновесия. Наблюдения покажут, что только в случае устойчивого равновесия возникают колебания.



Рис. 322

Если тело находится в состоянии устойчивого равновесия, и ему сообщают некоторую энергию  $\Delta E$  (рис. 323), то предоставленное самому себе, оно начинает колебаться. Такие колебания называются **свободными**. С динамической точки зрения, причина возникновения свободных колебаний в такой системе объясняется следующим образом.

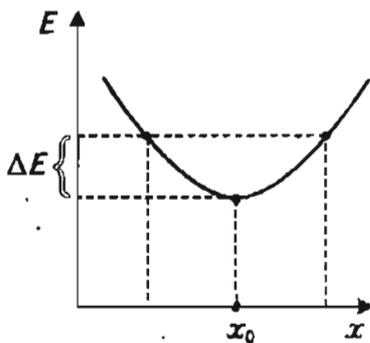


Рис. 323

Если мы выведем шарик из положения безразличного равновесия (рис. 324, а), то не возникает силы, которая вернула бы его в прежнее состояние. Если вынести шарик из состояния неустойчивого равновесия, равнодействующая направлена от положения равновесия (рис. 324, б). И только при выведении тела из состояния устойчивого равновесия

возникает сила, возвращающая тело к положению равновесия (рис. 324, в). Ускорение направлено к этому положению при отклонении шарика от него в любую сторону.

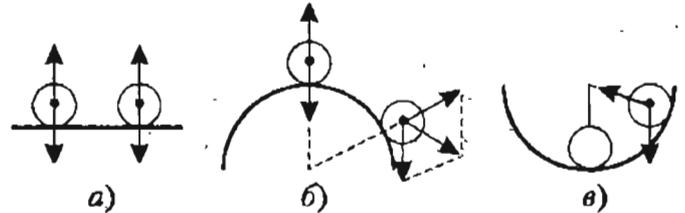


Рис. 324

#### Затухание свободных колебаний

Наблюдения за свободными колебаниями показывают: первоначальный запас механической энергии, сообщенной системе с целью возбуждения колебаний, постепенно убывает; амплитуда их постепенно уменьшается; колебания прекращаются. Эти свойства свободных колебаний объясняются действием на тело силы сопротивления, которая при небольших скоростях колебаний пропорциональна скорости. Эта сила, всегда направленная против вектора скорости, совершает отрицательную работу. В процессе этой работы уменьшается механическая энергия.

#### Гармонические колебания – идеальная модель свободных колебаний

Пусть в колебательной системе время затухания колебаний очень велико, коэффициент сопротивления  $\beta$  достаточно мал. Колебания затухают очень медленно. Затуханием можно пренебречь. В этом идеальном случае колебания называются **собственными**, их частоту и период можно обозначить как  $\omega_0$  и  $T_0$ . Определим собственные частоту и период двух простых систем: груз на пружине и груз на нити.

**Колебания груза на пружине.** Пусть массой пружины можно пренебречь по сравнению с массой груза (рис. 325). Будем считать, что деформация пружины подчиняется закону Гука:  $F_x = -kx$ , а ее длина достаточно мала.

Запишем второй закон Ньютона для груза:

$$ma_x = -kx - \beta v_x$$

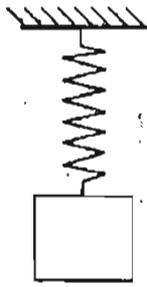


Рис. 325

При большом времени затухания колебаний коэффициент трения  $\beta$  мал, и можно пренебречь силой сопротивления. Тогда  $ma_x = -kx$ .

Мы видим, что в рассмотренном идеальном случае груз на пружине совершает гармонические колебания с циклической частотой  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ .

Период этих колебаний равен  $T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{k}{m}}$ .

При слабом затухании условный период  $T$  затухающих колебаний близок к  $T_0$ .

**Колебания груза на нити.** Пусть груз имеет массу  $m$  и подвешен к нерастяжимой нити, длина которой значительно больше размеров груза (рис. 326).

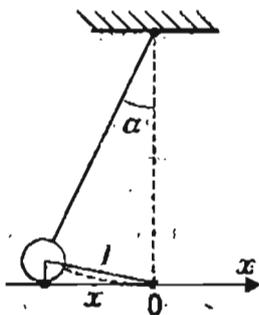


Рис. 326

Воспользуемся вторым законом Ньютона:

$ma_x = -mgs\sin\alpha - \beta v_x$ . При малом трении можно пренебречь слагаемым  $\beta v_x$  и записать:  $ma_x = -mgs\sin\alpha$ .

Сократив обе части равенства на  $m$ , получим:

$$a_x = -gs\sin\alpha.$$

Оказывается, ускорение пропорционально не углу  $\alpha$ , определяющему координату  $x$  груза, а синусу этого угла. Сила  $F$  не является квазиупругой, а груз не совершает гармонических колебаний. Однако

при малых углах отклонения  $\sin\alpha$  можно заменить углом  $\alpha$ , если, конечно, измерять угол в радианах. Посмотрите на таблицу, приведенную ниже.

Таблица 19

$\alpha$ , град.	0	5	10	15	20	25	30
$\alpha$ , рад.	0	0,087	0,174	0,261	0,349	0,436	0,524
$\sin\alpha$	0	0,087	0,174	0,259	0,342	0,423	0,500
Отличие в % $\sin\alpha$ от $\alpha$	0	0	0	0,8	2	3	4

Действительно, даже при  $30^\circ$  между  $\sin\alpha$  и  $\alpha$  разница не превышает 5%, а в пределах до  $15^\circ$  эта разница не превышает 1%. Следовательно, при малых углах  $\sin\alpha$  можно заменить на  $\alpha$ , дугу можно заменить на координату и вместо

$a_x = -gs\sin\alpha = -g\sin\left(\frac{x}{l}\right)$  можно записать:

$$a_x = -g\left(\frac{x}{l}\right) = -\frac{g}{l}x.$$

В этом идеальном случае малых колебаний ускорение груза оказывается пропорционально координате со знаком «-». Следовательно, колебания груза будут гармоническими, их циклическая частота  $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$ , период  $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ .

Рассмотренная идеальная модель называется математическим маятником.

Лабораторные работы

### Изучение свободных колебаний

Цель работы: исследование влияния силы трения и амплитуды на период свободных колебаний.

Оборудование: прочная нить, небольшой грузик, часы.

Возможный вариант выполнения.

Подвесьте груз на двух нитях длиной около метра. Отклоните нить от вертикали на угол приблизительно  $20^\circ$ – $30^\circ$  (рис. 327).

Определите число колебаний и время, за которое амплитуда уменьшится в некоторое число раз, например в 2 раза.

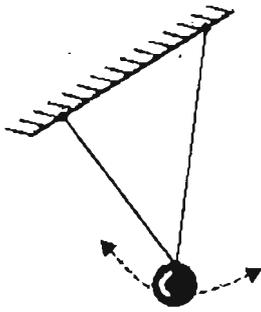


Рис. 327

Повторите эксперимент, отклонив первоначально маятник на расстояние  $X_{max}$ , и снова определите число колебаний и время уменьшения амплитуды в 2 раза, т. е. до величины  $\frac{X_{max}}{4}$ .

Результаты измерений запишите в таблицу:

Удалось ли вам обнаружить зависимость времени одного колебания от амплитуды?

Укрепите на двух нитях с помощью скрепок лист бумаги площадью около 1–2 дм<sup>2</sup> (рис. 328). Проведите аналогичную серию опытов.

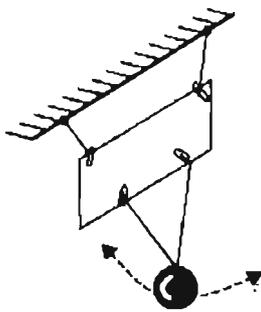


Рис. 328

Удалось ли вам обнаружить во второй серии опытов зависимость времени одного колебания от амплитуды?

Удалось ли вам обнаружить влияние сопротивления на время одного колебания?

Опыты, аналогичные тем, которые вы провели, и теоретический анализ свободных колебаний показывают следующее:

А) Время одного колебания при достаточно малых амплитудах не зависит от амплитуды (рис. 329). Это время называется **условным периодом**. (Слово «условный» используется для того, что-

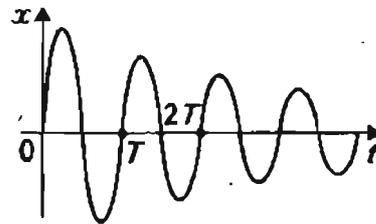


Рис. 329

бы подчеркнуть, что через время  $T$  тело не возвращается в прежнее состояние).

Б) Степень затухания характеризуется величиной  $\tau$  («тау»), которая называется **временем релаксации**. Время релаксации  $\tau$  – время, за которое амплитуда колебаний убывает в  $e = 2,7$  раз.

В) Время релаксации позволяет определить коэффициент сопротивления  $\beta$  в формуле для силы сопротивления:  $F_{сопр} = -\beta v$ . Именно  $\beta = \frac{2m}{\tau}$ , где  $m$  – масса колеблющегося тела.

*Экспериментальные задания*

Определите время релаксации  $\tau$  и коэффициент сопротивления  $\beta$  для колебаний, изученных в лабораторной работе.

Представим себе, что трение в системе настолько велико, что вся механическая энергия, сообщенная системе при попытке возбуждения колебания, «была потрачена» на работу против трения при возвращении тела в положение равновесия (рис. 330). Колебания в этом случае не возникнут вообще.

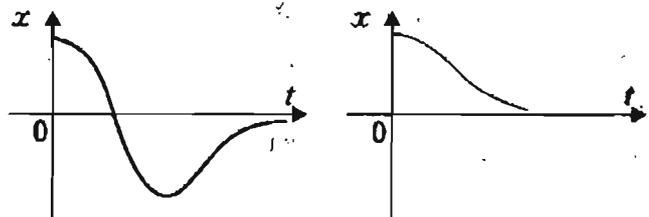


Рис. 330

*Практикум по  
решению задач*

### Примеры решения задач: пружинный маятник

#### Пример 1

Определите период колебаний груза на пружине, если известно, что при подвешивании груза пружина удлиняется на 4 см.

**Решение**

Из условия равновесия груза на пружине следует, что:

$$mg = kx \quad (1),$$

где  $m$  – масса груза,  $k$  – жесткость пружины.

Период колебаний груза на пружине равен:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2).$$

Из выражений (1) и (2) получаем:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{x}{g}} \approx 0,4 \text{ с.}$$

#### Пример 2

Чему равен период малых колебаний груза массой  $m$  в системе, изображенной на рис. 331, а. Жесткости пружин равны  $k_1$  и  $k_2$ . Трением пренебречь.

**Решение**

При малой деформации  $x$  силы, действующие на тело, направлены в одну сторону. Суммарная сила равна:

$$F_x = -k_1x - k_2x = -(k_1 + k_2)x.$$

Так как  $F_x = mx''$ , то получаем дифференциальное уравнение:

$$x'' = -\frac{k_1 + k_2}{m}x \rightarrow x'' = -\omega_0^2x.$$

Следовательно, период колебаний груза равен:

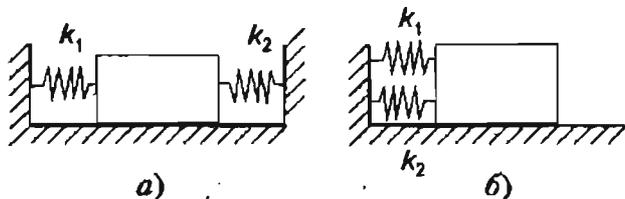


Рис. 331

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_1 + k_2}}.$$

**Примечание.** Данная система тел эквивалентна системе, изображенной на рис. 331, б.

#### Пример

На гладкой горизонтальной поверхности находятся два тела массами  $m$  и  $3m$ , связанные пружиной жесткостью  $k$ . Чему равен период малых колебаний системы тел? Трением пренебречь (рис. 332).

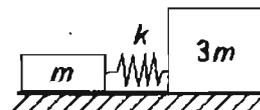


Рис. 332

**Решение**

Колебания тел возникают относительно центра масс системы  $s$ . Центр масс пружины делит ее на части, обратно пропорциональные массам:

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{3m}{m} = 3.$$

Жесткости частей пружины равны:

$$k_1 = k \frac{x_1 + x_2}{x_1} = \frac{4}{3}k; \quad k_2 = k \frac{x_1 + x_2}{x_2} = 4k.$$

Период колебаний системы можно определить, применив формулу периода колебаний для левого

тела:  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_1}} = 2\pi \sqrt{\frac{3m}{4k}};$

или для правого тела:  $T = 2\pi \sqrt{\frac{3m}{k_2}} = 2\pi \sqrt{\frac{3m}{4k}}.$

В общем виде, если массы тел равны  $m_1$  и  $m_2$ , иско-

мый период колебаний равен:  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m_1 m_2}{k(m_1 + m_2)}}.$

#### Пример 4

Оцените период малых вертикальных колебаний ареометра, плавающего в воде. Масса ареометра  $m$ , радиус цилиндрической части  $R$ .

**Решение**

При погружении ареометра на малое расстояние  $x$  на него будет действовать нескомпенсированная Архимедова сила, направленная вертикально вверх:  $F_a = \rho S g x.$

С учетом знаков проекций, запишем:

$$m\ddot{x} = -\rho S g x, \quad \ddot{x} = -\frac{\rho S g}{m} x \rightarrow \ddot{x} = -\omega_0^2 x.$$

Следовательно, искомый период равен:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{\rho S g}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{\rho \pi R^2 g}}.$$

Этот ответ мы получили, пренебрегая вязкостью жидкости и эффектом «присоединенной» массы воды. Реально период колебаний ареометра будет несколько больше.

### Примеры решения задач: математический маятник

#### Пример 1

Определите период колебаний математического маятника длиной  $l$ , подвешенного в лифте, в следующих случаях:

- А) лифт движется с ускорением  $a$ , направленным вертикально вверх;
- Б) лифт движется равномерно;
- В) лифт движется с ускорением  $a$ , направленным вертикально вниз.

#### Решение

Период колебаний математического маятника, укрепленного на неподвижном подвесе, равен:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Это соотношение легко получить, записав второй закон Ньютона для малых колебаний математического маятника:  $-mg \sin \alpha = ma$ .

Так как угол  $\alpha$  мал, то  $\sin \alpha = \alpha = \frac{x}{l}$ ;

$$-g \frac{x}{l} = a \rightarrow \ddot{x} = -\frac{g}{l} x.$$

Обозначив  $\frac{g}{l} = \omega_0^2$ , получим дифференциальное уравнение. Решением этого уравнения является функция  $x = X_m \sin(\omega t + \varphi)$ .

Это легко проверить прямой подстановкой решения в дифференциальное уравнение. Следовательно,

$$\text{но, } T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Если лифт движется с постоянным ускорением  $\ddot{a}$ , направленным вертикально вверх, то в инерци-

альной системе отсчета «лифт» на тело массой  $m$ , кроме силы тяжести, будет действовать сила инерции  $\vec{F} = -m\ddot{a}$ , направленная вниз. Тогда суммарная сила будет равна  $m(g + a)$ , а период колебаний:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g+a}}.$$

В случае, когда ускорение лифта направлено вниз, сила инерции будет направлена вверх,

$$\text{а } T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g-a}}.$$

При равномерном движении лифта ( $a = 0$ )

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

#### Пример 2

При увеличении длины математического маятника на 0,2 м его период увеличился на 0,1 с. Каким был начальный период колебаний?

#### Решение

Начальный период колебаний определяется формулой:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \tag{1}$$

После увеличения длины маятника можно записать:

$$T_1 + \Delta T = 2\pi \sqrt{\frac{l_1 + \Delta l}{g}}. \tag{2}$$

Из уравнений (1) и (2) получаем:

$$\begin{aligned} l_1 &= \frac{T_1^2 g}{4\pi^2}; \quad l_1 + \Delta l = \frac{g(T_1 + \Delta T)^2}{4\pi^2} \rightarrow \\ \rightarrow \Delta l &= \frac{g}{4\pi^2} [(T_1 + \Delta T)^2 - T_1^2] \rightarrow \\ \rightarrow T_1 &= \frac{2\pi^2 \Delta l}{g \Delta T} - \frac{\Delta T}{2}; \quad T_1 \approx 3,9 \text{ с.} \end{aligned}$$

### Решить самостоятельно

1. Зная, что ускорение свободного падения на Луне равно  $1,62 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ , определите, на сколько изменится там ход маятниковых часов?
2. Чему равна длина секундного маятника на Земле? На Луне?

3. Чему равен период малых колебаний груза массой  $m$  в системе, изображенной на рис. 333. Жесткости пружин равны  $k_1$  и  $k_2$ . Трением пренебречь.

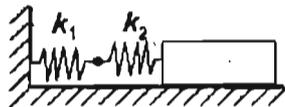


Рис. 333

4. Как изменится период колебаний груза, подвешенного на упругом жгуте, если от него отрезать  $\frac{1}{4}$  часть и подвесить на него тот же груз?

Контрольные  
работы

### Вариант 1

1. За 5 секунд маятник совершает 10 колебаний. Чему равен период колебаний?
- А) 5 с.                       Б) 2 с.  
 В) 0,5 с.                     Г) 50 с.
2. Груз, подвешенный на пружине, совершает свободные колебания между точками 1 и 3 (рис. 334). В какой точке равнодействующая сил, приложенных к грузу, минимальна?

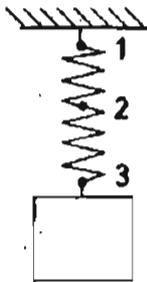


Рис. 334

- А) В точках 1 и 3.  
 Б) В точке 2.  
 В) В точках 1, 2, 3.  
 Г) Ни в одной точке.
3. Как изменится период колебаний груза на пружине, если жесткость пружины увеличить в 4 раза?
- А) Увеличится в 4 раза.  
 Б) Увеличится в 2 раза.

- В) Уменьшится в 2 раза.  
 Г) Уменьшится в 4 раза.

4. Чему равен период колебаний груза массой  $m$  на двух пружинах жесткостью  $k$ , соединенных параллельно (рис. 335)?

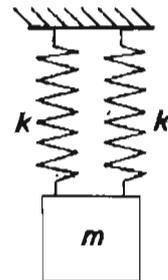


Рис. 335

- А)  $2\pi\sqrt{\frac{m}{2k}}$                        Б)  $2\pi\sqrt{\frac{2m}{k}}$   
 В)  $\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$                                Г)  $4\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

5. Координата колеблющегося тела изменяется по закону  $X = 5 \cos\left(\frac{\pi}{2}t\right)$  (м).

Чему равна частота колебаний? Все величины выражены в единицах СИ.

- А)  $\frac{1}{4}$  Гц.                               Б)  $\frac{1}{2}$  Гц.  
 В) 2 Гц.                                       Г) 4 Гц.

6. Каким выражением определяется период колебаний математического маятника?

- А)  $2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$                                Б)  $2\pi\sqrt{\frac{g}{l}}$

- В)  $\frac{l}{2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}}$                                Г)  $\frac{l}{2\pi\sqrt{\frac{g}{l}}}$

7. Каков примерно период колебаний математического маятника длиной 40 м?  $g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

А) 12 с.       Б)  $\frac{1}{12}$  с.

В) 2 с.       Г)  $\frac{1}{2}$  с.

8. Как изменится период колебаний математического маятника, если его длина уменьшится в 9 раз?

А) Увеличится в 3 раза.

Б) Увеличится в 9 раз.

В) Уменьшится в 3 раза.

Г) Уменьшится в 9 раз.

9. Как будет изменяться период колебаний математического маятника, если его поднять над поверхностью Земли?

А) Увеличится.

Б) Уменьшится.

В) Не изменится.

Г) Сначала увеличится, затем уменьшится.

**Вариант 2**

1. За 6 секунд маятник совершает 12 колебаний. Чему равна частота колебаний?

А) 0,5 Гц.

Б) 2 Гц.

В) 72 Гц.

Г) 6 Гц.

2. Груз, подвешенный на пружине, совершает свободные колебания между точками 1 и 3 (рис. 336). В какой точке равнодействующая сил, приложенных к грузу, максимальна?

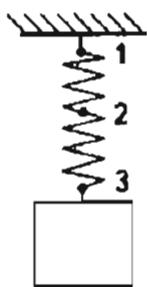


Рис. 336

А) В точках 1 и 3.

Б) В точке 2.

В) В точках 1, 2, 3.

Г) Ни в одной точке.

3. Как изменится период колебаний груза на пружине, если массу груза уменьшить в 4 раза?

А) Увеличится в 4 раза.

Б) Увеличится в 2 раза.

В) Уменьшится в 2 раза.

Г) Уменьшится в 4 раза.

4. Как изменится период колебаний груза на пружине, если жесткость пружины уменьшить в 16 раз?

А) Увеличится в 4 раза.

Б) Увеличится в 2 раза.

В) Уменьшится в 2 раза.

Г) Уменьшится в 4 раза.

5. Чему равен период колебаний груза массой  $m$  на двух пружинах жесткостью  $k$ , соединенных последовательно (рис. 337)?

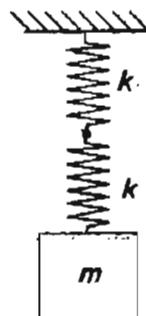


Рис. 337

А)  $2\pi\sqrt{\frac{m}{2k}}$

Б)  $2\pi\sqrt{\frac{2m}{k}}$

В)  $\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

Г)  $4\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

6. Как будет изменяться период колебаний математического маятника, если его поднять над поверхностью Земли?

А) Увеличится.

Б) Уменьшится.

В) Не изменится.

Г) Сначала увеличится, затем уменьшится.

7. Каков примерно период колебаний математического маятника длиной 10 м?  $g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

А) 6 с.

Б)  $\frac{1}{6}$  с.

В) 1 с.

Г) 1 с.

8. Каким выражением определяется период колебаний груза на пружине?

А)  $2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ .

Б)  $2\pi\sqrt{\frac{k}{m}}$ .

В)  $\frac{l}{2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}}$ .

Г)  $\frac{l}{2\pi\sqrt{\frac{k}{m}}}$ .

9. Координата колеблющегося тела изменяется по

закону  $X = 5 \cos\left(\frac{\pi}{2}t\right)$  (м).

Чему равен период колебаний? Все величины выражены в единицах СИ.

А)  $\frac{1}{4}$  с.

Б)  $\frac{1}{2}$  с.

В) 2 с.

Г) 4 с.

### Контрольная работа повышенного уровня сложности

#### Вариант 1

1. Коробка массой  $M$ , лежащая на горизонтальном столе, присоединена своей верхней гранью к гру-

зу массой  $m$ , подвешенному на пружине с жесткостью  $k$ . При какой амплитуде колебаний груза коробка начнет подпрыгивать?

2. На горизонтальной площадке лежит тело. При какой частоте вертикальных колебаний площадки с амплитудой 2,5 мм тело оторвется от площадки?

3. В неподвижном лифте висит секундный маятник. Лифт начал опускаться с ускорением  $0,17 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . С каким периодом будет качаться маятник?

#### Вариант 2

1. Сравните периоды колебаний пружинного маятника с параметрами  $m$  и  $k$  в лифте, движущемся: равномерно; равноускоренно с ускорением  $a$ , направленным вверх; с ускорением  $a$ , направленным вниз.

2. Чему равен период малых колебаний ртути, налитой в U-образную трубку? Длина ртутного столба  $l$  (рис. 338).



Рис. 338

3. Чему равен период математического маятника длиной  $l$ , подвешенного в вагоне? Вагон движется горизонтально с ускорением  $a$ .

## 4. АВТОКОЛЕБАНИЯ. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ. РЕЗОНАНС (УРОВЕНЬ Б)

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

### Автоколебания

Свободные колебания являются затухающими. Поэтому в «чистом виде» они не используются на практике. В данном разделе будет показано, как используются свойства свободных колебаний при создании автоколебательных систем и при вынужденных колебаниях.

Именно свободные колебания позволяют получить незатухающие колебания, происходящие с частотой собственных колебаний  $\omega_0$  «затухающей системы». При этом используется источник энергии, азвивающий постоянную во времени мощность.

Одна из первых в истории таких систем – маятниковые часы. Они представлены в правой части схемы 22. На рисунке отмечены основные части, позволяющие объяснить получение незатухающих колебаний: маятник 1, источник энергии – гиря 2, анкер 3, храповое колесо 4.

При колебаниях маятника дважды за период концевые части анкера входят в зацепление с зубьями храпового колеса. Именно в процессе этого взаимодействия энергия гири передается маятнику и компенсирует его потери. Понятно, что именно сам маятник «управляет» потоком энергии от источника постоянной мощности.

Таким образом, колебания автоколебательных систем обладают двумя свойствами: они оказываются незатухающими и происходят с собственной частотой  $\omega_0$  колебательной системы.

Любые автоколебательные системы содержат устройство, выполняющее функции источника энергии,

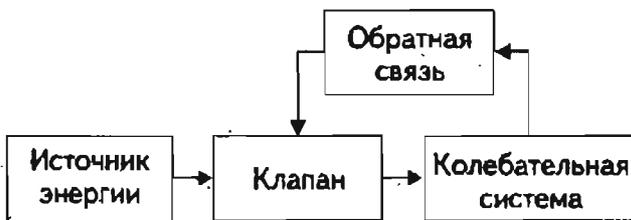


Рис. 339

гии колебательной системы, с использованием которого сама колебательная система управляет поступлением энергии к ней с помощью клапана (рис. 339).

### Вынужденные колебания

Автоколебательные генераторы незатухающих колебаний позволяют осуществить **вынужденные колебания**.

Простейший случай вынужденных колебаний – это воздействие гармонически изменяющейся силы  $f = f_m \sin \omega_e t$  на колебательную систему, в которой могут происходить свободные колебания (рис. 340).

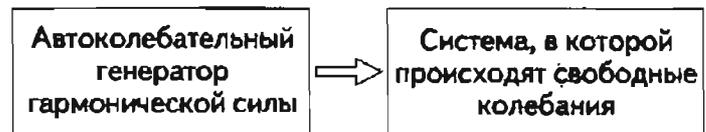


Рис. 340

Экспериментальная установка, позволяющая получать вынужденные колебания, представлена в центральной части схемы 22.

В основу «получения» гармонической силы положена идея геометрической модели гармонических колебаний. Шнур от пружины привязан к стержню, укрепленному на краю равномерно вращающегося диска. Сила натяжения при этом изменяется приблизительно по гармоническому закону:

$$f = f_m \cos \omega t,$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения диска.

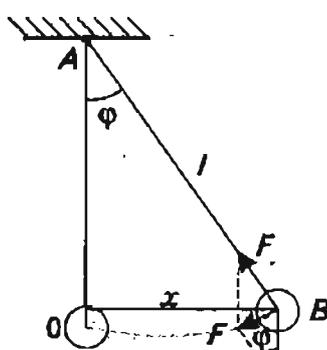
При изменении угловой скорости вращения диска изменяется циклическая частота вынуждающей силы. Ее амплитуда  $f_m$  изменяется за счет изменения расстояния стержня от центра диска: чем больше это расстояние, тем больше  $f_m$ .

Не представляет труда изменить массу колеблющегося груза  $m$ , жесткость пружин  $k$ . Для изменения  $\beta$  можно прикрепить лист бумаги или картона к колеблющемуся грузу.

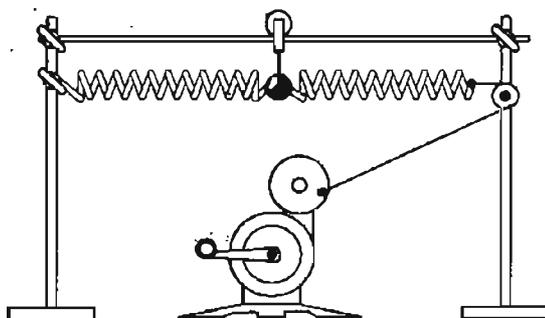
## СХЕМА 22

## МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

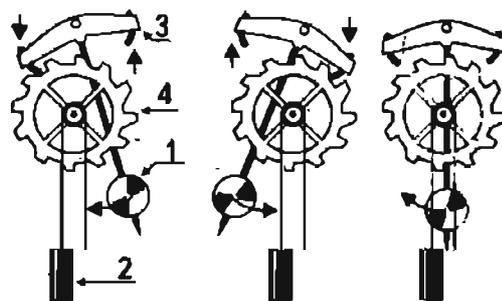
Свободные колебания



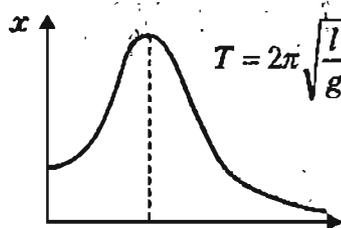
Вынужденные колебания



Автоколебания



Резонанс



Графики колебаний



Негармонические



### Результаты экспериментального исследования установившихся колебаний

Исследование вынужденных колебаний на представленной на схеме 22 установке (или на аналогичной) позволяет сделать следующие выводы:

1) Частота установившихся вынужденных колебаний совпадает с частотой вынуждающей силы.

2) Амплитуда вынужденных колебаний  $X_m$ :

прямо пропорциональна амплитуде силы  $f_{max}$  и обратно пропорциональна массе  $m$  колеблющегося тела;

зависит от частоты  $\omega$  вынуждающей силы;

при заданных амплитуде и частоте вынуждающей силы  $X_m$  уменьшается с ростом  $\beta$ .

3) Вынужденные колебания всегда отстают по фазе от колебаний вынуждающей силы. График зависимости фазы колебаний от частоты  $\omega$  приведен на рис. 341, а.

Поскольку колебания скорости движения опережают по фазе колебания самого тела (его координаты) на  $\frac{\pi}{2}$ , то легко построить график зависимости фазы скорости от частоты (рис. 341, б).

### Два способа объяснения свойств вынужденных колебаний (уровень Б)

При теоретическом анализе вынужденных колебаний используют два подхода: динамический и энергетический.

При динамическом подходе используется второй закон Ньютона:

$$ma = -kx - \beta v + f_m \cdot \cos \omega t.$$

При энергетическом объяснении свойств вынужденных колебаний анализируются обмен энергией между генератором вынуждающей силы и колебательной системой и потери механической энергии в процессе работы силы трения (рис. 342).

**Уровень В.** В примерах решения задач чаще используется динамический подход, при качествен-

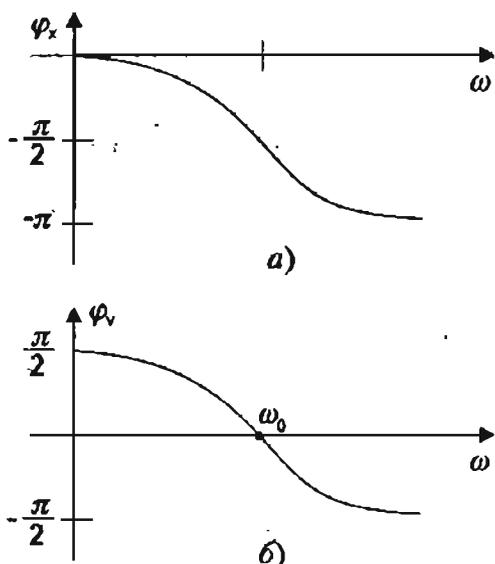


Рис. 341

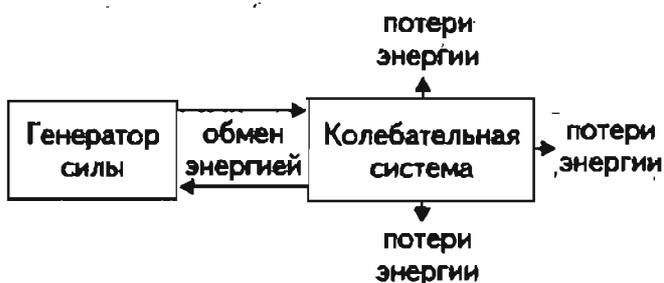


Рис. 342

ном объяснении особенностей вынужденных колебаний удобен энергетический подход.

Целесообразно анализировать мощность  $N$ , которая показывает скорость преобразования энергии из одного вида в другой:

$$N = \frac{\text{изменение энергии}}{\text{промежуток времени}} \left[ \text{Вт} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \right]$$

Вспомним, что мощность  $N = Fv$ . При колебаниях и сила, и скорость изменяются, следовательно, мощность  $N$  оказывается переменной величиной (рис. 343). На графике зависимости мощности от

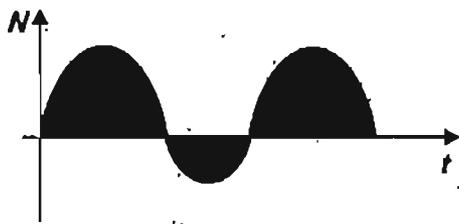


Рис. 343

времени энергия определяется как площадь. Знак мощности указывает на направление потока энергии. Если мощность положительна, то колебательная система теряет энергию.

Баланс энергии колебательной системы определяется мощностью двух сил: силы трения и вынуждающей силы.

Мощность силы трения всегда отрицательна. Это следует из того, что колебания скорости движения  $v_x$  и силы трения  $f_{тр} = -\beta v_x$  происходят в противофазе (рис. 344).

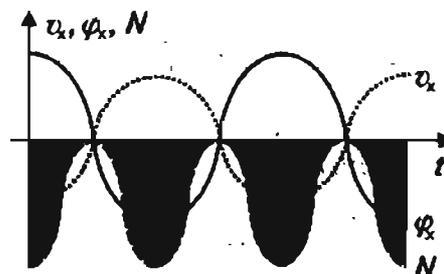


Рис. 344

В среднем потери энергии в процессе работы силы трения пропорциональны квадрату скорости.

Обмен энергией между источником внешней силы и колебательной системой определяется произведением  $f_x \cdot v_x$ . И существенно зависит от того, каковы их фазы по отношению друг к другу.

Поступление энергии пропорционально первой степени скорости, а потери энергии пропорциональны квадрату скорости (рис. 345).



Рис. 345

При малых скоростях поступление энергии превышает потери, скорость колебаний увеличивается (увеличивается и амплитуда, ведь  $v_{max} = X_{max} \cdot \omega$ ). Но потери пропорциональны квадрату скорости, а поступление энергии пропорционально первой степени скорости. При некотором значении скорости (и амплитуды) устанавливается средний за пери-

од баланс между потерей энергии и ее поступлением (рис. 346).

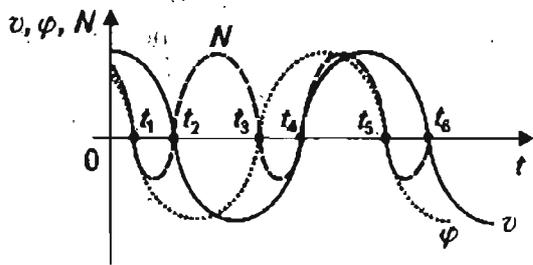


Рис. 346

В промежутки времени  $(0 - t_1)$ ,  $(t_2 - t_3)$ ,  $(t_4 - t_5)$  сила и скорость направлены одинаково, сила совершает положительную работу, энергия поступает от генератора к колеблющемуся телу. В промежутки времени  $(t_1 - t_2)$ ,  $(t_3 - t_4)$ ,  $(t_5 - t_6)$  сила и скорость имеют противоположные направления: часть энергии возвращается обратно в генератор внешней периодической силы.

### Резонанс

Одно из важнейших свойств вынужденных колебаний называется **резонансом**.

**Резонанс** – явление возрастания амплитуды вынужденных колебаний при приближении частоты вынуждающей силы к частоте собственных колебаний системы.

Экспериментальные исследования показывают, что при частотах, как больших, так и меньших  $\omega_{\text{рез}}$ , амплитуда колебаний уменьшается.

График зависимости фазы скорости колебаний от частоты вынуждающей силы (рис. 347) показыва-

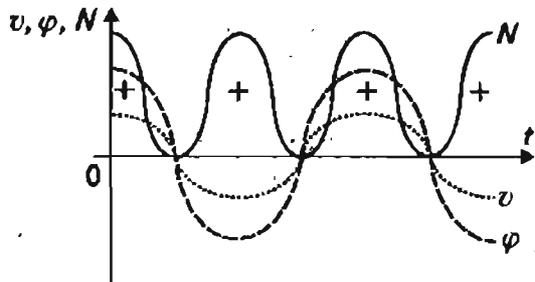


Рис. 347

ет; что при  $\omega = \omega_0$  сдвиг фаз  $\varphi_0 = 0$ . Следовательно, вынуждающая сила во все время работы генератора совершает положительную работу.

Поток энергии всегда направлен в одну сторону: от генератора к колеблющемуся телу, – обратные потоки отсутствуют. Система «раскачивается» до максимальной амплитуды.

Резонанс используется в радиотехнике, акустике, оптике. В различных сооружениях и машинах, подвергающихся периодическим воздействиям, резонанс весьма опасен. С этими явлениями связано до 80% аварийных ситуаций.

*Лабораторные работы*

### Сборка электромеханического автоколебательного генератора незатухающих колебаний

**Цель работы:** нахождение основных элементов автоколебательной системы, регулирование частоты колебаний.

**Оборудование:** источник постоянного тока, электромагнит разборный с принадлежностями, проводники.

**Возможный вариант выполнения**

Соберите цепь по схеме, представленной на рис. 348. Определите в данном генераторе основные части автоколебательной системы, придумайте способ изменения частоты колебаний генератора.

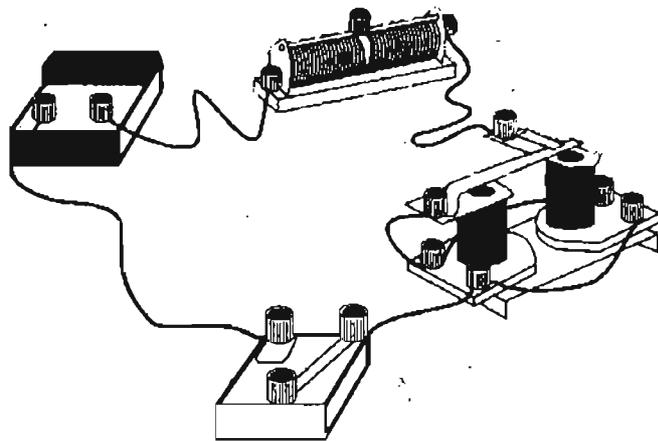


Рис. 348

*Практикум по  
решению задач*

**Примеры решения задач**

**Пример 1**

Точка подвеса математического маятника длиной  $l$  движется под действием внешней силы в горизонтальном направлении по закону:  $x(t) = a \sin \omega t$ . Считая колебания малыми, найдите амплитуду  $b$  и фазу  $\varphi$  установившихся вынужденных колебаний маятника.

**Решение**

Будем считать, что трение в системе достаточно для установления вынужденных колебаний, но при нахождении их параметров трением можно пренебречь.

В этом случае частота вынужденных колебаний будет равна  $\omega$ , в то время как частота собственных колебаний равна  $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$ .

Представим вынужденные колебания данного маятника как свободные колебания другого маятника длиной  $L$ , которую можно определить из условия:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}} \rightarrow L = \frac{g}{\omega^2}.$$

Рассмотрим случаи, когда:

- а)  $\omega < \omega_0$ ;
- б)  $\omega \rightarrow \omega_0$ ;
- в)  $\omega > \omega_0$ .

а) Пусть  $\omega < \omega_0$ , тогда  $L > l$  (рис. 349, а). Из рисунка видно, что вынужденное колебание происходит в той же фазе, что и движение точки подвеса, а амплитуду легко рассчитать из подобия треугольников:

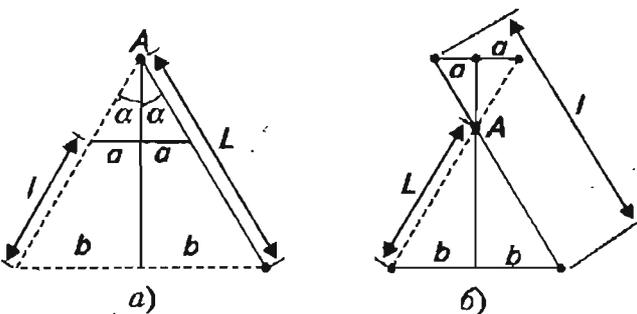


Рис. 349

$$\frac{b}{a} = \frac{L}{L-l} \rightarrow b = a \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2}.$$

- б) Из полученного выражения видно, что при  $\omega \rightarrow \omega_0$  наступает резонанс – резкое возрастание амплитуды колебаний.
- в) В случае  $\omega > \omega_0$  длина маятника  $L < l$  (рис. 349, б). При этом легко видеть, что движение нижнего конца маятника происходит в противофазе с движением точки подвеса, а амплитуда равна:

$$\frac{b}{a} = \frac{L}{l-L} \rightarrow b = a \frac{\omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2}.$$

Зависимость модуля амплитуды вынужденных колебаний  $|b|$  от частоты колебания представлена на рис. 350.

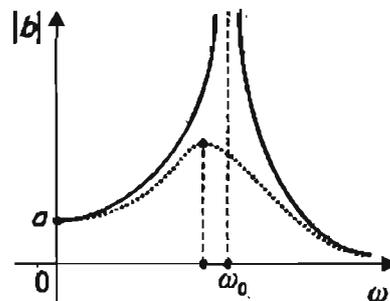


Рис. 350

При учете затухания вид кривой изменится (штриховая линия). Максимум амплитуды оказывается конечным и приходится на частоту, чуть меньшую, чем  $\omega_0$ . Этот сдвиг увеличивается при увеличении сил сопротивления. Подробнее об этом см. пример 3.

**Пример 2**

С помощью установки, изображенной на рис. 351, вращая рукоятку коленчатого вала, можно создать вынужденные колебания груза массой  $m$ , подвешенного на пружине жесткостью  $k$ .

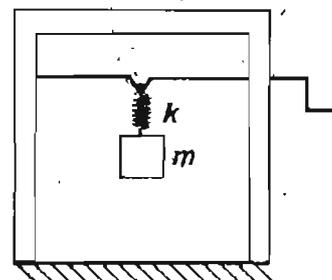


Рис. 351

Какова зависимость амплитуды установившихся вынужденных колебаний от частоты и каковы фазовые соотношения этих колебаний с вынуждающей силой, считая ее изменяющейся по закону

$$F(t) = F_0 \cos \omega t.$$

Решение

Запишем уравнение установившихся колебаний, пренебрегая трением:

$$x'' + \omega_0^2 x = \frac{F_0}{m} \cos \omega t, \quad (*)$$

где  $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$ ;  $x'' = a_x$ .

Будем искать решение в виде  $x(t) = b \cos \omega t$  (к моменту установления собственные колебания с частотой  $\omega_0$  уже затухнут).

Рассчитаем вторую производную:

$$x''(t) = -b\omega^2 \cos \omega t,$$

и подставим ее вместо  $x(t)$  в уравнение (\*):

$$(\omega_0^2 - \omega^2)b \cos \omega t = \frac{F_0}{m} \cos \omega t.$$

Отсюда следует:  $b = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}$ .

При  $\omega = 0$ ,  $b = \frac{F_0}{m\omega_0^2} = \frac{F}{k}$ .

При  $\omega \rightarrow \omega_0$  амплитуда резко возрастает (рис. 352).

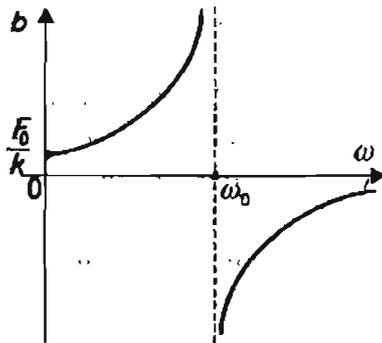


Рис. 352

При  $\omega > \omega_0$  наша формула дает отрицательное значение. Это означает, что при  $\omega < \omega_0$  колебания происходят в одной фазе с вынуждающей силой, а при  $\omega > \omega_0$  — в противофазе.

Можно во всех случаях амплитуду считать положительной, введя сдвиг фаз  $\theta$  между вынуждающей силой и смещением:

$$x(t) = |b| \cos(\omega t + \theta),$$

где  $\theta = 0$  (при  $\omega < \omega_0$ );  $\theta = -\pi$  (при  $\omega > \omega_0$ ) (рис. 353).

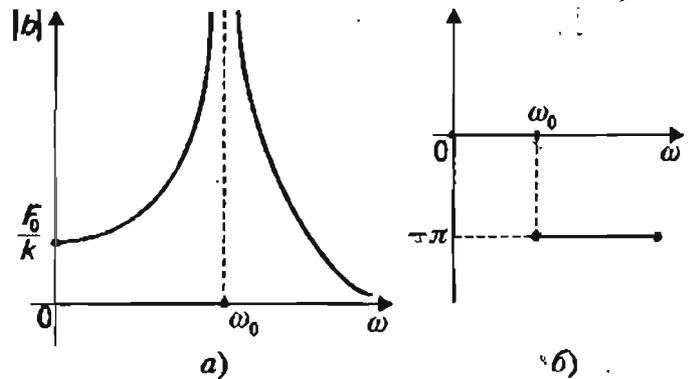


Рис. 353

### Решить самостоятельно

1. Чему равен сдвиг фазы  $\theta$  между колебаниями силы, действующей на качели, и смещением качелей: при  $\omega < \omega_0$ ;  $\omega = \omega_0$ ;  $\omega > \omega_0$ .
2. Чему равен при резонансе сдвиг фазы между колебаниями силы, действующей на груз, подвешенный на пружине, и скоростью груза?
3. Чему равна амплитуда скорости вынужденных колебаний груза массой  $m = 0,1$  кг на пружине жесткостью  $k = 400 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ ,  $\beta = 0,1 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ?

Контрольные работы

### Вариант 1

1. Объясните работу системы электромеханического генератора (рис. 348) как автоколебательной системы.
2. Пользуясь графиком, представленным на рис. 354, определите резонансную частоту системы.
3. На рис. 355 представлены графики зависимости вынуждающей силы и скорости движения колеблющегося тела от времени. Изобразите на этом рисунке график зависимости мощности источника силы от времени и опишите обмен энергией между колеблющимся телом и источником силы.
4. Мальчик несет на коромысле ведра с водой, период собственных колебаний которых 1,6 с. При

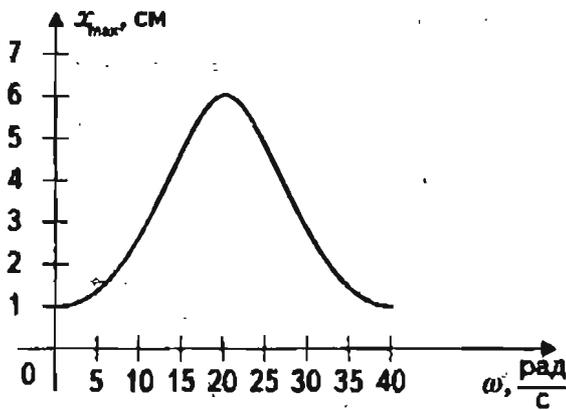


Рис. 354

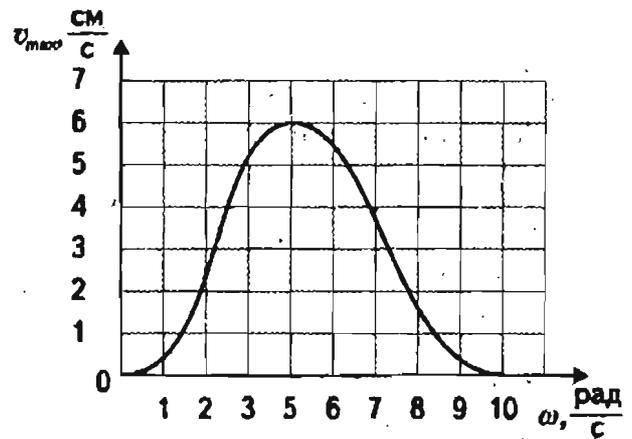


Рис. 356

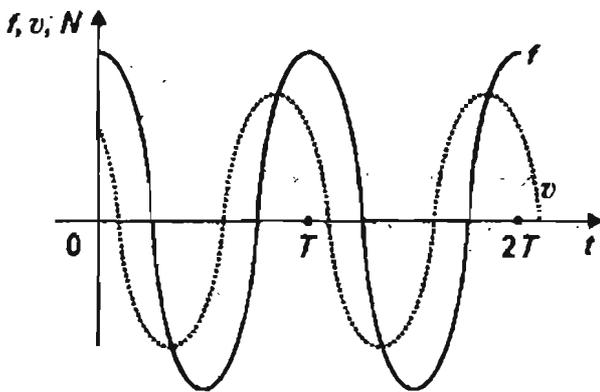


Рис. 355

какой скорости движения вода начнет особенно сильно выплескиваться из ведер, если длина шага мальчика равна 60 см?

5. Чему равны амплитуды вынужденных колебаний груза массой  $m = 0,1$  кг на пружине жесткостью  $k = 400 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ , если амплитуда колебаний силы

$F_0 = 1$  Н, а коэффициент сопротивления  $\beta = 0,1 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$  при:

$\omega \ll \omega_0, \omega \approx \omega_0, \omega \gg \omega_0.$

**Вариант 2**

1. Объясните работу маятниковых часов с гирей как автоколебательной системы.

2. На рис. 356 изображен график зависимости амплитуды скорости движения груза от угловой скорости вращения диска в установке, представленной в центральной части схемы 22. Определите массу колеблющегося груза, если жесткость каждой пружины  $50 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ .

3. На рис. 357 изображен график зависимости вынуждающей силы, действующей на колебательную систему, от времени. Изобразите на этом же рисунке графики зависимости скорости движения груза и мощности источника вынуждающей силы при резонансе. Опишите обмен энергией между источником силы и телом.

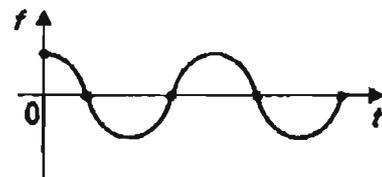


Рис. 357

4. При какой скорости поезда маятник длиной 11 см, подвешенный в вагоне, особенно сильно раскачивается, если расстояние между стыками рельсов 12,5 м?

5. Запишите уравнения гармонических свободных и вынужденных колебаний груза при следующих параметрах: амплитуда 20 см, начальная фаза  $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$  рад, циклическая частота  $\pi \text{ с}^{-1}$ , масса груза  $m = 0,1$  кг, коэффициент сопротивления  $\beta = 0,1 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ , максимальная действующая на груз сила  $F_0 = 10$  Н. Рассмотрите случай равенства частоты вынуждающей силы собственной частоте колебаний.

## 5. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ

*Конспект.  
Таблицы. Схемы*

### Механические волны

**Скорость волн. Поперечные и продольные волны.** Во введении отмечалось, что при волновом движении не происходит перемещения вещества; волновое движение — это процесс распространения колебания в среде, давления в среде, ее плотности, передача энергии, импульса, момента импульса.

Важнейшая характеристика волнового процесса — скорость распространения изменений состояния среды. Будем обозначать ее буквой  $u$ , чтобы отличать от скорости движения частиц вещества  $v$ .

Приведем пример. Скорость  $u$  звуковых волн в воздухе — порядка  $330 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Амплитуда скорости движения частиц воздуха  $v$ , возникающей в связи с движением волны от источника с частотой 2000–3000 Гц, достигает всего  $1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Важно обратить внимание еще на одно свойство волнового движения. В однородном веществе скорость волн  $u$  — величина постоянная, частицы же вещества движутся с ускорением. В том же примере со звуковой волной от источника колебаний с частотой 2000–3000 Гц амплитуда ускорения частиц достигает  $10 \frac{\text{км}}{\text{с}^2}$ .

Соотношение между направлениями векторов  $\vec{v}$  и  $\vec{u}$  позволяет классифицировать волны на два типа: продольные и поперечные. В **продольных волнах** векторы  $\vec{u}$  и  $\vec{v}$  параллельны, в **поперечных** — вектор  $\vec{u}$  перпендикулярен вектору  $\vec{v}$  ( $\vec{u} \perp \vec{v}$ , рис. 358).

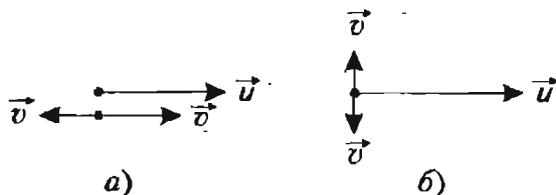


Рис. 358

Если в среде возникают силы упругости, при деформации растяжения или сжатия твердых тел, то в такой среде могут распространяться продольные волны. В газах при этом происходят изменения давления  $\Delta p$  и плотности.

Поперечные волны распространяются в твердых телах, если происходит деформация сдвига, которая характеризуется модулем сдвига  $G$ .

В газе или жидкости возникают только продольные волны: сдвиг частей жидкости или газа не вызывает упругих сил, такие силы возникают только при изменении давления. (Волны на поверхности воды не относятся в чистом виде ни к поперечным, ни к продольным волнам).

В твердых телах могут существовать волны и продольные, и поперечные.

Скорость продольных волн в твердом теле:

$$u_{пр} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \text{ а скорость поперечных волн } u_{пом} = \sqrt{\frac{G}{\rho}},$$

где  $\rho$  — плотность тела;  $E$  — модуль Юнга.

Чаще всего  $G > E$  (например для стали  $G = 80 \cdot 10^{10}$  Па,  $E = 20 \cdot 10^{10}$  Па), и скорости поперечных и продольных волн отличаются друг от друга. Максимального значения достигает скорость волн в алмазе ( $18 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ ).

Различие в скорости поперечных и продольных волн позволяет определять расстояние до эпицентра землетрясения.

Действительно, пусть расстояние от эпицентра до сейсмической станции  $r$ . Тогда сейсмограф (правая часть схемы 23) зафиксирует «приход» поперечной волны в момент времени  $t_1 = \frac{r}{u_1}$ , затем

«приход» продольной волны  $t_2 = \frac{r}{u_2}$ .

$$\text{Время } \Delta t = t_2 - t_1 = \frac{r}{u_1} - \frac{r}{u_2} = r \left( \frac{1}{u_1} - \frac{1}{u_2} \right)$$

Отсюда легко определить расстояние  $r$ .

### Гармонические волны

Гармонические волны – это процесс распространения в веществе гармонических колебаний. Значение гармонических волн состоит в том, что любые другие волны могут быть представлены в виде суммы конечного или бесконечного числа гармонических волн.

Источник гармонических волн – это гармонически колеблющееся тело. В качестве примера таких волн можно привести звуковую волну, распространяющуюся от звучащего камертона или от вибратора, описание которого представлено во введении в раздел.

Пусть гармонический закон, по которому колеблется источник волн, имеет вид:  $y = y_0 \cdot \sin \omega t$ , где  $y_0$  – амплитуда колебаний,  $\omega$  – циклическая частота колебаний. Как будет колебаться какая-либо точка, отстоящая от источника на расстоянии  $x$  (рис. 359)? Ответ на этот вопрос дает уравнение волны.

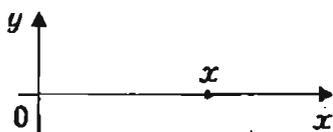


Рис. 359

При составлении уравнения волны мы должны знать: чему равна частота колебаний, от чего зависит фаза колебаний, как определяется амплитуда колебаний.

Частота колебаний любой точки волны совпадает с частотой колебаний источника. Это связано с тем, что при распространении волны все частицы вещества совершают вынужденные колебания.

Амплитуда колебаний определяется несколькими факторами. Она тем меньше, чем больше поглощение энергии веществом. Но даже в идеальном случае отсутствия затухания амплитуда будет уменьшаться при удалении от источника. Это связано с тем, что при постоянной мощности источника колебания захватывают все большие объемы вещества. Следовательно, одно и то же количество энергии, излученное в пространство, распределяется между большим числом колеблющихся частиц. Если волна распространяется вдоль идеального стержня, струны, шнура, то в этом случае амплитуда будет одинакова (одномерная волна).

По поводу фазы колебаний можно сказать следующее. Колебания любой точки вещества, удаленной от источника на большее расстояние, будут отставать по фазе от предыдущей. Это связано с тем, что процесс распространения имеет длительность  $\Delta t = \frac{x}{u}$ .

Все сказанное и позволяет ответить на поставленный вопрос.

Если источник колеблется по закону  $y = y_0 \cdot \sin \omega t$ , то любая точка на расстоянии  $x$  от источника колеблется в соответствии с законом:

$$y_x = y_{0x} \sin \omega(t - \Delta t), \quad y_x = y_{0x} \sin \omega \left( t - \frac{x}{u} \right) \\ \rightarrow y_{0x} \sin \left( \omega t - \frac{\omega x}{u} \right)$$

Это и есть искомое уравнение гармонической волны.

Для одномерной волны (вдоль идеальной очень длинной струны, стержня) уравнение гармонической волны будет иметь вид:

$$y_x = y_0 \sin \left( \omega t - \frac{\omega x}{u} \right)$$

### Длина волны

Уравнение гармонической волны позволяет полностью описать состояние любой частицы вещества в любой момент времени. В частности, если по шнуру «бежит» гармоническая волна, то можно определить форму шнура в любой момент времени и определить колебание любой точки шнура.

Зависимость смещения  $y$  от времени  $t$  и координаты  $x$  представлена на рисунке (см. схему 24). Этот рисунок отражает основную особенность волны – двойную периодичность: во времени и пространстве.

Представьте себе: вы взяли ножницы и «разрезаете» этот рисунок вдоль оси  $t$ . Вы всегда получите синусоиду с периодом  $T$ . Уравнение этой синусоиды можно получить из уравнения волны

$$y_x = y_0 \sin \left( \omega t - \frac{\omega x}{u} \right)$$

Полученная вами синусоида описывает колебания (зависимость смещения от времени) любой точки шнура.

**СХЕМА 23**

**МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ**

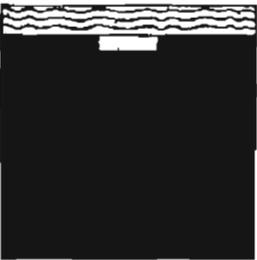
Свойства волн



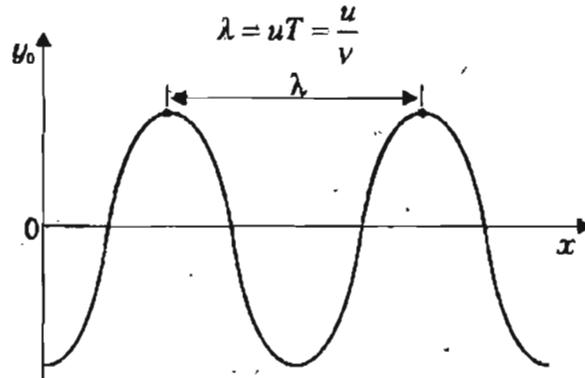
Отражение



Интерференция



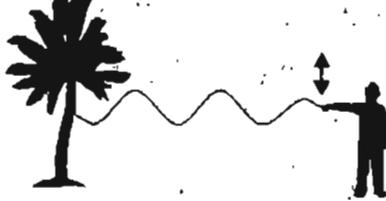
Дифракция



Уравнение волны

$$y = y_0 \sin \omega \left( t - \frac{x}{u} \right)$$

Поперечные волны



Продольные волны



1. Записывающее перо
2. Пружина
3. Груз
4. Подвижная лента

Сейсмограф

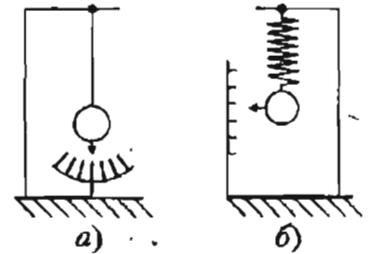
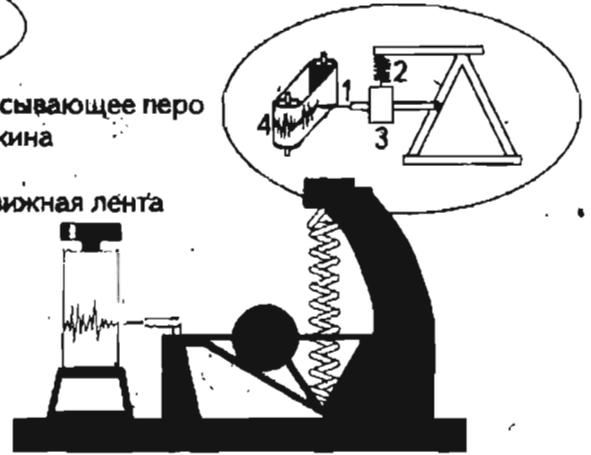


Схема горизонтального (а) и вертикального (б) сейсмографов



Если  $x = 0$ , то мы получим колебание источника волн:  $y = y_0 \sin \omega t$ .

Пусть  $x = x_1$  (вы разрезаете рисунок вдоль оси  $t$  через точку с координатой  $x_1$ ). Колебания этой точки будут отставать по фазе от колебаний источника на  $-\frac{\omega x_1}{u}$ :

$$y_{x_1} = y_0 \sin \left( \omega t - \frac{\omega x_1}{u} \right)$$

Пусть  $x = x_2$ . Колебания этой точки будут отставать по фазе от колебаний источника на  $-\frac{\omega x_2}{u}$ :

$$y_{x_2} = y_0 \sin \left( \omega t - \frac{\omega x_2}{u} \right)$$

Таким образом, период во времени равен периоду колебаний источника волн и означает, что все точки вещества колеблются с этим периодом, но их колебания сдвинуты по фазе по отношению друг к другу на

$$\Delta \varphi = \left( -\frac{\omega x_1}{u} \right) - \left( -\frac{\omega x_2}{u} \right) = \frac{\omega}{u} (x_2 - x_1).$$

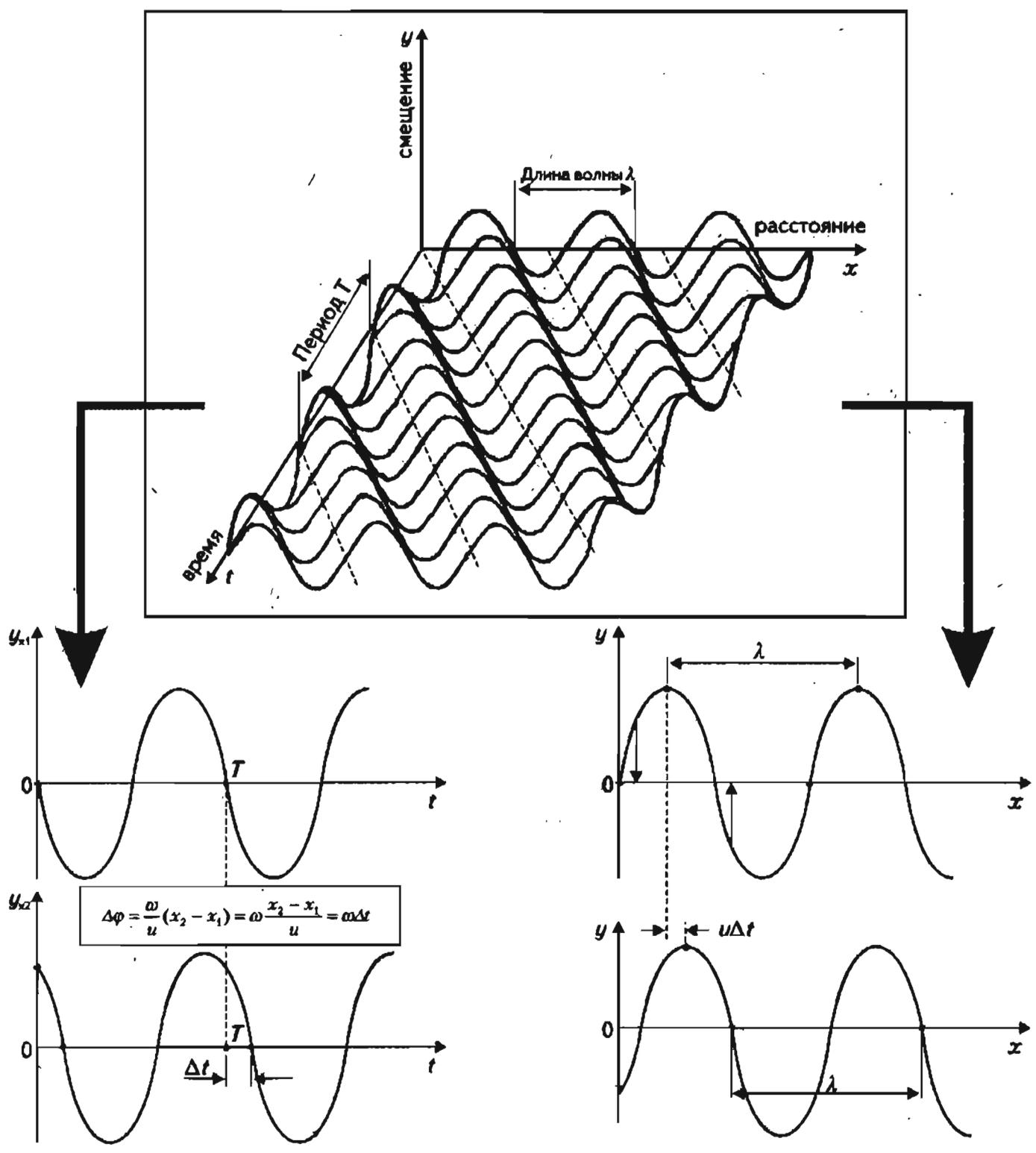
Полученное соотношение позволяет определить пространственную периодичность, характерную для волн. Этот пространственный период вдоль оси  $X$  обозначен греческой буквой  $\lambda$  (лямбда).

Действительно, найдем расстояние между точками  $(x_2 - x_1)$  такое, что  $\Delta \varphi$  равно периоду синуса  $2\pi$ . Тогда:

СХЕМА 24

УРАВНЕНИЕ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ

$$y_{x,t} = y_{0x} \sin\left(\omega t - \frac{\omega x}{u}\right)$$



$$\Delta\varphi = \frac{\omega}{u}(x_2 - x_1) = \omega \frac{x_2 - x_1}{u} = \omega\Delta t$$

$$2\pi = \frac{\omega}{u}(x_2 - x_1).$$

Отсюда:

$$x_2 - x_1 = \frac{2\pi u}{\omega} = \frac{2\pi u}{\frac{2\pi}{T}} = uT.$$

Произведение  $uT$  и есть «пространственный» период, называемый длиной волны  $\lambda = uT$ .

Итак, **длина волны** — это расстояние между точками, которые колеблются в одинаковой фазе. Формула  $\lambda = uT$  показывает, что длина волны — это расстояние, на которое волна распространяется за время  $T$  одного периода.

Синусоиду с «пространственным» периодом вы получите, если мысленно разрежете рисунок на схеме 24 параллельно оси  $X$  через любую точку на оси времени. Выполнив эту процедуру, вы получите мгновенную фотографию шнура в любой момент времени.

Функция  $y = y_0 \sin\left(\omega t - \frac{\omega x}{u}\right)$  имеет период вдоль оси  $X$ , равный  $uT$ . Действительно, из равенства

$$2\pi = \frac{\omega x}{u} \text{ следует, что:}$$

$$x = \frac{2\pi u}{\omega} = \frac{2\pi u T}{2\pi} = uT = \lambda.$$

### Дисперсия гармонических волн (уровень В)

Изложенное выше показывает, что скорость волн зависит от свойств вещества ( $E, G, \rho$ ), его температуры. Для гармонических волн важным оказывается вопрос о зависимости скорости гармонических волн от частоты колебаний.

Для некоторых типов волн такая зависимость существует. Например, для гармонических поверхностных волн скорость  $u$  пропорциональна корню квадратному из частоты:  $u \sim \sqrt{\nu}$  (рис. 360). Зави-

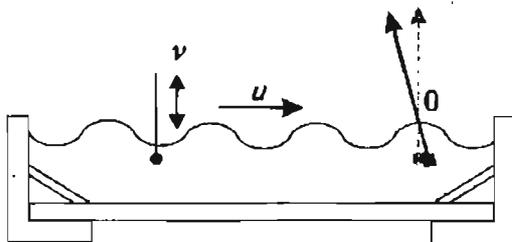


Рис. 360

симость скорости волн от частоты называется **дисперсией** (рис. 361).

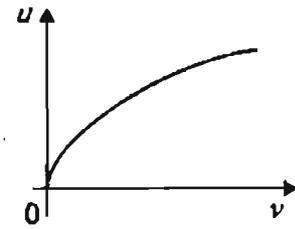


Рис. 361

В связи с явлением дисперсии важно правильно понимать соотношение  $\lambda = uT$ . Эта формула означает, что скорость  $u$  равна произведению длины волны на частоту:  $u = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu$ .

Рассмотрим звуковую волну от двух камертонов с частотами  $\nu_1 = 400$  Гц и  $\nu_2 = 800$  Гц (рис. 362). Дисперсия звуковых волн отсутствует. Поэтому волны распространяются с одинаковой скоростью  $u_1 = u_2 = 330 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Однако длина волны у них раз-

ная:  $\lambda_1 = \frac{u}{\nu_1}$  и  $\lambda_2 = \frac{u}{\nu_2}$ .

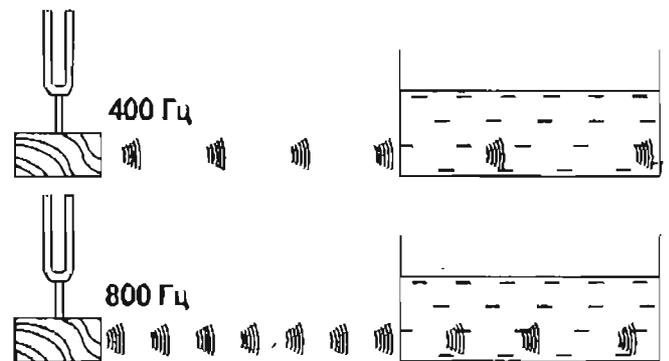


Рис. 362

Пусть волны переходят в воду, скорость их увеличивается примерно в 4 раза, независимо от частоты. Это приводит к изменению длины волны также в 4 раза.

### Энергия гармонических волн (уровень Б)

При распространении гармонических волн каждая частица вещества совершает гармонические коле-

бания. Средняя за период энергия такой частицы равна:

$$\frac{1}{2} kA^2 = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2.$$

Этот результат был получен на основе того, что при колебании одиночного маятника массой  $m$  происходит преобразование кинетической энергии маятника (которой он обладает в положении равновесия) в потенциальную энергию (которой он обладает при максимальном отклонении).

При распространении волны колебания всех частиц взаимосвязаны друг с другом, и происходит непрерывная передача энергии от источника. Потенциальная энергия оказывается максимальной в тех же объемах среды, где кинетическая, т. е. в положении равновесия. Это и понятно: максимальная потенциальная энергия будет там, где наибольшая относительная деформация.

Рис. 363 показывает, что шнур в наибольшей степени деформирован именно в положении равновесия.

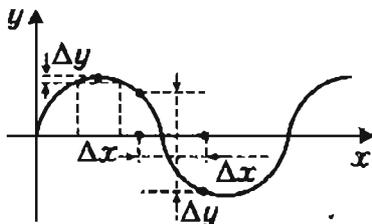


Рис. 363

Никакого противоречия с законом сохранения энергии здесь нет, потому что энергия все время переносится в направлении скорости  $\vec{v}$ , а источником энергии является источник волн.

Для средней энергии данного участка волны можно записать выражение:

$$E_{\text{ср}} = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 = \frac{1}{2} \rho\omega^2 A^2 V.$$

### Интерференция волн

На второй фотографии в схеме 25 показано явление интерференции (наложения) колебаний двух систем волн, исходящих от двух так называемых когерентных источников. Такие источники колеблются в одинаковой фазе с одинаковой частотой.

Явление состоит в том, что общее волновое поле разделится на области I и II. В областях I колебания ослабляются, в областях II они усиливаются (рис. 364). Можно предсказать расположение этих областей (рис. 365, а, б).

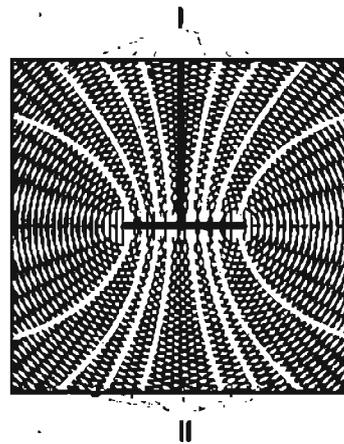


Рис. 364

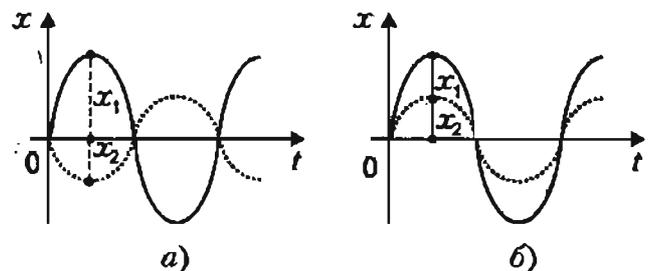


Рис. 365

Очевидно, ослабление колебаний будет происходить там, куда колебания от двух источников будут приходить в противофазе.

Тогда  $X_{\text{мI}} = X_{\text{м1}} - X_{\text{м2}}$ . Если  $X_{\text{м1}} = X_{\text{м2}}$ , то  $X_{\text{мI}} = 0$ .

Ясно, что разность хода  $\Delta r_1$  должна быть равна нечетному числу волн:

$$\Delta r_1 = (2n+1) \frac{\lambda}{2} \rightarrow \Delta r_1 = \frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2} \dots$$

В тех точках пространства, для которых разность хода равна  $\Delta r_{\text{II}} = \frac{2n\lambda}{2}$  (т. е. четному числу полуволн), колебания складываются и амплитуда точек среды равна:  $X_{\text{мII}} = X_{\text{м1}} + X_{\text{м2}}$ .

Следствием интерференции оказывается явление изгиба волновых лучей, когда волна встречает пре-

пятствие в виде экрана или отверстия. Такое явление получило название **дифракции** (см. рисунок в нижней части схемы 23 и рис. 366, а, б).

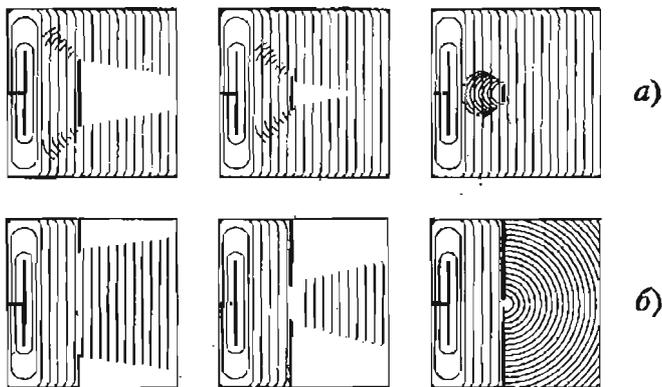


Рис. 366

### Звуковые волны

В принципиальном отношении звуковые волны ничем не отличаются от механических: все понятия, характеристики, явления, представленные выше в данном разделе, можно отнести и к звуковым волнам.

Специфика звуковых волн связана только с тем, что звуковые волны — это средство общения людей, и поэтому в акустике главным образом рассматриваются волны в воздухе с учетом особенностей восприятия звуков человеком (так называемая физиологическая акустика). Рассмотрим некоторые особенности звуковых волн (схема 25).

### Частотная классификация звуковых волн

Органы слуха человека устроены так, что в виде звуков воспринимаются волны, в которых происходят колебания в пределах  $20 \text{ Гц} < \nu < 20000 \text{ Гц}$ . Волны с частотами ниже  $20 \text{ Гц}$  называются **инфразвуками**, волны с частотами больше  $20000 \text{ Гц}$  называются **ультразвуками**.

### Звуковые волны в воздухе — продольные волны

Механические волны в воздухе могут быть только продольными. В чем же особенности звуковых волн в воздухе?

Источниками звуков являются колеблющиеся тела (левая часть схемы 25). Волны распространяются только в воздухе: при отсутствии воздуха волн нет. Это показывает опыт, схема которого представлена в центральной части схемы 25.

В звуковой волне распространяется со скоростью звука  $u_{зв}$  избыток давления  $\Delta P$  над обычным средним давлением воздуха  $P_{атм}$ . Следовательно, для звукового давления  $\Delta P$  можно записать уравнение волны:

$$\Delta P = \Delta P_0 \sin \left( \omega t - \frac{\omega x}{u_{зв}} \right)$$

О каких давлениях  $\Delta P_0$  идет речь?

Если атмосферное давление  $P_{атм} = 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ , то при едва слышимом звуке звуковое давление  $\Delta P$  составляет  $10^{-5} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ ; при очень громком звуке  $\Delta P$  доходит до  $10^3 \text{ Па}$ .

С какой скоростью звук распространяется в воздухе? В центральной части схемы 25 приведена формула для расчета скорости звука в воздухе:

$$u_{зв} = \sqrt{\frac{1,4R}{M} T}$$

В этой формуле:

$$R = 8,3 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}};$$

$M$  — молярная масса воздуха,  $M = 0,029 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ ;

$T$  — абсолютная температура,  $T = t^\circ\text{C} + 273$ .

Определим скорость звука в воздухе при температуре  $t^\circ\text{C} = 18^\circ\text{C}$ . Получим:  $u_{зв} \approx 340 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Звуковая волна, как и любая другая, переносит энергию. В большом концертном зале ( $V = 20\,000 \text{ м}^3$ ) суммарная энергия не превосходит потенциальной энергии груза массой  $10 \text{ г}$  на высоте  $1 \text{ м}$ .

### Классификация звуков по спектральному составу колебаний источника

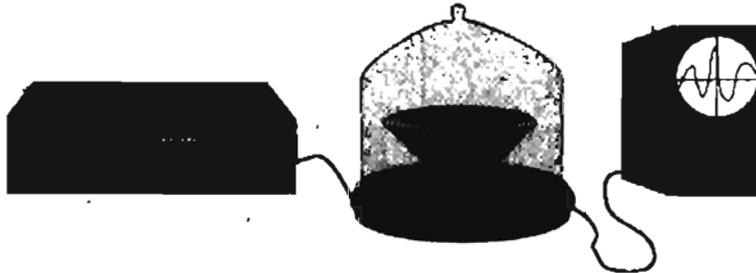
Обратимся к источнику звука, изображенному в левом столбце схемы 25. Камертон совершает гармонические колебания с одной единственной частотой. Он является источником простого (тонального) звука (рис. 367).

Струна гитары совершает сложное периодическое колебание. Она — источник музыкального звука (рис. 368). Это колебание может быть представлено некоторой суммой гармонических колебаний.

**СХЕМА 25**

**ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ**

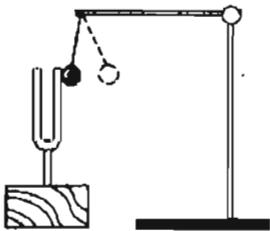
Распространение звука



Использование звуковых волн



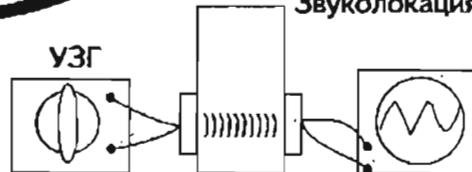
Источники звука



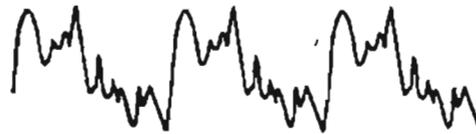
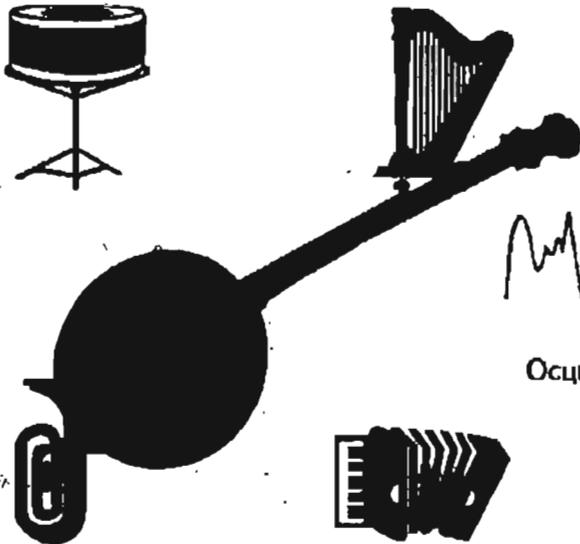
Звук — продольная волна  

$$u_{зв} = \sqrt{\frac{1,4RT}{M}}$$

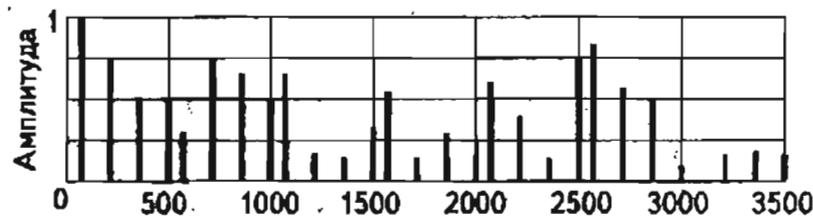
Звуколокация



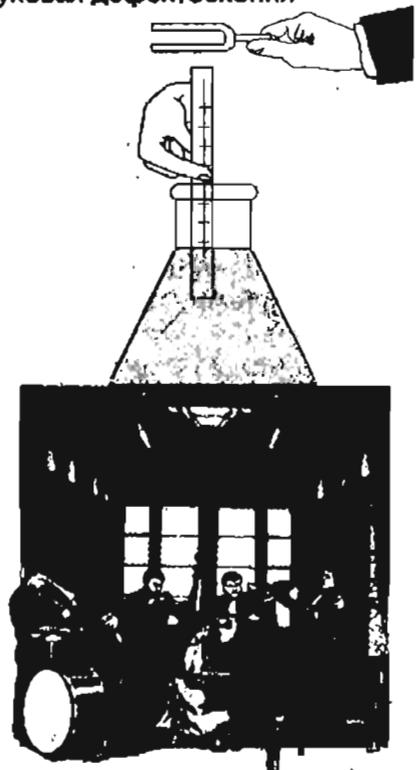
Ультразвуковая дефектоскопия



Осциллограмма звуковой волны



Частотный спектр звука



Акустический резонанс

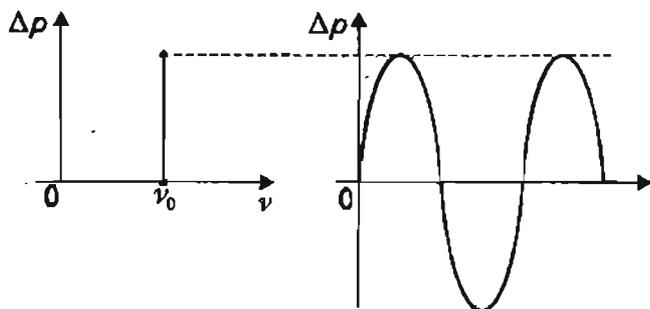


Рис. 367

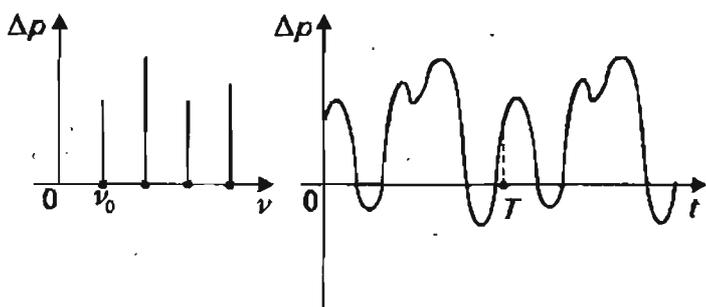


Рис. 368

Частота самого низкого из них называется **основным тоном**.

Часто встречается звук, колебание давления в котором не является периодической функцией времени. Этот звук называется шумом.

### Физиологические характеристики музыкальных звуков

Музыкальные звуки характеризуются тремя параметрами: громкостью, высотой и тембром.

Какими характеристиками звуковой волны (или их источника) определяют эти физиологические параметры?

Проще всего на это вопрос ответить по отношению к простому (тональному) звуку. Для этого звука можно записать уравнение:

$$\Delta P = \Delta P_0 \sin \left( \omega t - \frac{\omega x}{u_{\text{зв}}} \right)$$

Громкость звука определяется энергией, т. е. квадратом амплитуды давления  $\Delta P_0^2$  и частотой  $\omega^2$ . (При этом мы не учитываем конкретные особенности слуха конкретного человека.) Высота тона — тембр — тем выше, чем больше частота  $\omega$ .

Простой гармонический звук не имеет тембра, именно потому он и не называется музыкальным.

Чем определяются характеристики музыкального звука?

Громкость его определяется вкладом энергии всех его составляющих, т. е. суммой:

$$\Delta P_{01}^2 \omega_1^2 + \Delta P_{02}^2 \omega_2^2 + \dots$$

Высота звука определяется частотой основного тона.

Музыкальные звуки при *одинаковой* частоте основного тона имеют *разный* тембр. Тембр определяется спектральным составом, который при одном и том же основном тоне может быть различным.

### Эффект Доплера

Опыты показывают, что измеряемая наблюдателем частота  $\nu$  звуковых волн совпадает с частотой  $\nu_0$  колебаний источника волн только в том случае, когда наблюдатель и источник *неподвижны* относительно упругой среды, в которой распространяются эти волны. Во всех остальных случаях  $\nu \neq \nu_0$ .

Так, например, известно, что при приближении к неподвижному наблюдателю быстро движущегося электропоезда его звуковой сигнал кажется более высоким, а при удалении от наблюдателя — более низким, чем тон сигнала того же поезда, стоящего на станции. Это явление впервые было теоретически обосновано в 1842 г. австрийским физиком Х. Доплером и называется **эффектом Доплера**.

Два приведенных ниже примера показывают, как определяется изменение частоты.

#### Пример 1

Источник звуковой волны с частотой колебаний  $\nu_0$  удаляется от неподвижного приемника (приближается к неподвижному приемнику) со скоростью  $v$ . Какую частоту  $\nu$  воспримет неподвижный приемник, если скорость волны  $u < v$ ?

Решение

Длина неподвижного источника волны  $\lambda_0 = uT$ . Точки  $O, O_1, O_2, O_3$  (рис. 369) показывают положение источника колебаний через интервалы времени, равные периоду колебаний  $T$ . В тот момент, когда источник находится в точке  $O_3$ , фронты волн,

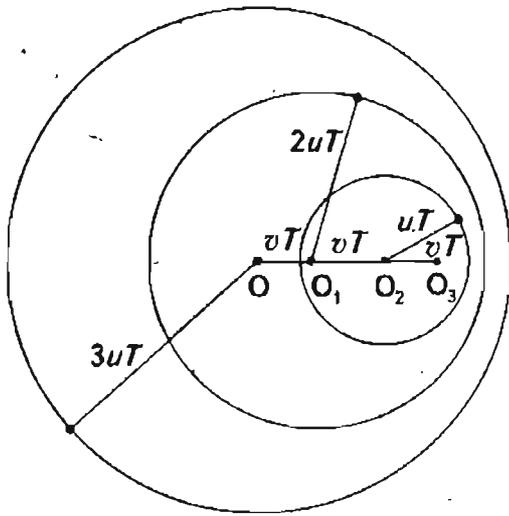


Рис. 369

испущенных источником в точках  $O, O_1, O_2$  будут сферическими с радиусами  $3uT, 2uT, uT$ . Из рисунка видно, что длина излученных волн, равная расстоянию между фронтами волн, различна в разных направлениях и отличается от длины волны неподвижного источника  $\lambda_0 = uT$ .

Длина волны  $\lambda_1$ , излученной источником по направлению движения, меньше  $\lambda_0$  на величину:

$$\frac{vT}{\lambda_1} = \lambda_0 - vT.$$

Длина волны  $\lambda_2$ , излученной источником в направлении, противоположном направлению движения источника, больше  $\lambda_0$  на величину:

$$\frac{vT}{\lambda_2} = \lambda_0 + vT.$$

Отсюда следует:

$$v_1 = \frac{u}{\lambda_1} = \frac{u}{\lambda_0 - vT} = \frac{u}{(u - v)T} = \frac{v_0}{1 - \frac{v}{u}};$$

$$v_2 = \frac{u}{\lambda_2} = \frac{u}{\lambda_0 + vT} = \frac{u}{(u + v)T} = \frac{v_0}{1 + \frac{v}{u}}.$$

Т. е. при приближении источника звука тон звука повышается, при удалении — понижается. Это легко заметить, слушая звук сирены приближающегося тепловоза.

Пример 2

Неподвижный источник звуковой волны имеет частоту колебаний  $\nu_0$ . Какую частоту воспринима-

ет приемник при удалении (приближении) от источника волны со скоростью  $v$ ?

Решение

В этом примере длина волны в среде остается неизменной:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_0 = uT = \frac{u}{\nu_0},$$

но скорость распространения волны относительно приемника меняется.

При приближении приемника к источнику колебаний со скоростью  $v$  скорость волны будет равна:  $(u + v)$ , при удалении:  $(u - v)$ .

Следовательно, частота колебаний, регистрируемая движущимся приемником, в первом случае будет равна:

$$\nu'_1 = \frac{u + v}{\lambda_0} = \frac{u + v}{u} \nu_0 = \nu_0 \left( 1 + \frac{v}{u} \right)$$

во втором случае:

$$\nu'_2 = \frac{u - v}{\lambda_0} = \frac{u - v}{u} \nu_0 = \nu_0 \left( 1 - \frac{v}{u} \right)$$

Сравнивая ответы, полученные в примерах 1 и 2, видим, что изменения частот в случаях движения источника волны или приемника различны.

Полученный результат не противоречит принципу относительности, так как здесь важно не относительное движение приемника и источника волны, а их движение относительно упругой среды, в которой распространяется волна, и с которой связана система отсчета.

*Тренировки по решению задач*

Механические волны

Пример 1

Бегущая поперечная волна движется вправо (рис. 370). В каком направлении движутся частицы  $A$  и  $B$ ?

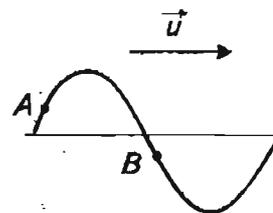


Рис. 370

**Решение**

Из рис. 371 видно, что точка *A* движется вниз, а точка *B* – вверх.

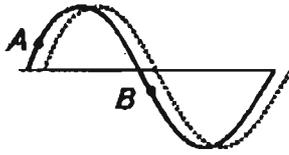


Рис. 371

**Пример 2**

На рис. 372 и 373 показаны графики колебания  $y(t)$  и волны  $y(x)$ . Чему равна скорость волны?

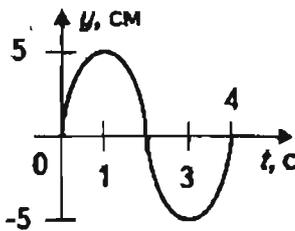


Рис. 372

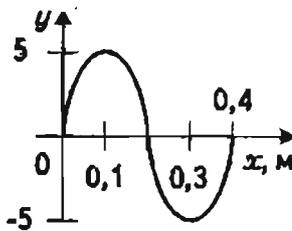


Рис. 373

**Решение**

Из рис. 372 находим период колебаний  $T = 4$  с, а из рис. 373 – длину волны  $\lambda = 0,4$  м. Отсюда скорость волны равна:  $v = \frac{\lambda}{T} = 0,1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

**Пример 3**

Чему равна скорость распространения поперечной волны в стальной струне диаметром  $d$ , если сила ее натяжения  $F$ ?

**Решение**

Пусть волна «бежит» по струне со скоростью  $v$  слева направо. Перейдем в систему отсчета, движущуюся вдоль волны со скоростью  $v$ . В этой системе отсчета волна неподвижна, а любой элемент  $\Delta l$  дви-

жется налево со скоростью  $v$  (рис. 374). Применим для элемента  $\Delta l$ , находящегося на вершине синусоиды, второй закон Ньютона. Так как  $\Delta l \ll l$ , то сила  $\vec{F}_{\text{равн}}$  равна  $F\Delta\alpha$  и направлена вниз. Масса этого элемента равна  $\Delta m = \rho S\Delta l$ , где  $\rho$  – плотность стали. Так как  $S = \frac{\pi d^2}{4}$ , то  $\Delta m = \frac{\rho \pi d^2}{4} \Delta l$ .

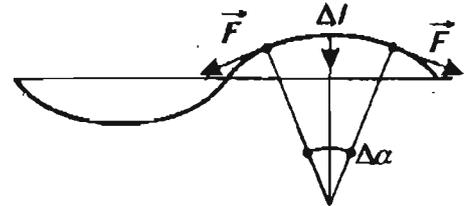


Рис. 374

Так как расстояние  $\Delta l$  мало, то участок синусоиды можно считать окружностью радиуса  $R$ , а его центростремительное ускорение равно:  $a_{\text{цс}} = \frac{v^2}{R}$ .

Подставляя полученные значения  $m$  и  $a$  в уравнение второго закона Ньютона, получим:

$$F\Delta\alpha = \frac{\rho \pi d^2}{4} \Delta l \frac{v^2}{R}$$

Учтя, что  $\Delta\alpha = \frac{\Delta l}{R}$ , получим:

$$\Delta v = \frac{2}{d} \sqrt{\frac{F}{\rho \pi}}$$

**Пример 4**

Используя результат решения предыдущей задачи, рассчитайте частоту  $\nu$  основного тона колебаний стальной струны диаметром  $d$  и длиной  $l$ , закрепленной с двух ее концов и натянутой с силой  $F$ .

**Решение**

При малом поперечном смещении струны вдоль нее распространяется бегущая волна. Отразившись от точки закрепления, волна отражается и, интерферируя с бегущей, образует стоячую волну. На рис. 375 изображена волна с максимальной длиной  $\lambda$  равной  $2l$ .

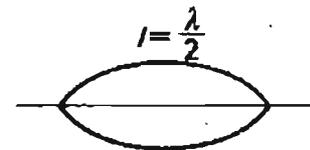


Рис. 375

Учитывая, что  $\lambda = \frac{v}{\nu}$ , получим:  $v = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2l}$ .

Подставляя значение скорости  $v$  из предыдущей задачи, получим искомое значение частоты основного тона колебаний струны:

$$v = \frac{1}{ld} \sqrt{\frac{F}{\rho\pi}}$$

**Звуковые волны**

**Пример 1**

Вычислить скорость звука в воздухе при давлении  $2 \cdot 10^5$  Па и плотности  $2,6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

**Решение**

Рассмотрим процесс возникновения звуковой волны в воздухе. В результате быстрого смещения пластины (рис. 376) у ее поверхности происходит

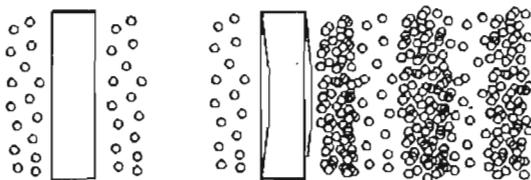


Рис. 376

повышение давления воздуха на  $\Delta p$  и повышение его плотности на  $\Delta \rho$ . Сжатый воздух расширяется и вызывает сжатие прилегающего к нему слоя воздуха. Этот процесс распространяется дальше. При распространении волны сжатия масса  $m$  воздуха, проходящего за время  $\Delta t$  через поверхность площадью  $S$  перпендикулярно направлению распространения волны, может быть выражена так:

$$\Delta m = \Delta \rho S v \Delta t, \tag{1}$$

где  $v$  — скорость распространения волны сжатия.

Отсюда следует, что изменение импульса равно:

$$\Delta m v = \Delta \rho S v^2 \Delta t. \tag{2}$$

Это изменение импульса вызвано давлением  $\Delta p$  и равно импульсу силы  $F$  за этот же интервал времени  $\Delta t$ :

$$F \Delta t = \Delta m v$$

или

$$\Delta p S \Delta t = \Delta \rho S v^2 \Delta t. \tag{3}$$

Отсюда для скорости распространения волны сжатия находим следующее выражение:

$$v = \sqrt{\frac{\Delta p}{\Delta \rho}}. \tag{4}$$

Если предположить, что при сжатии воздуха его температура не изменяется, то  $v = \sqrt{\frac{p}{\rho}}$ .

Подставив значение давления и плотности воздуха при нормальных условиях в формулу:

$$p = 10^5 \text{ Па}, \rho = 1,29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \text{ получим } v \approx 280 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Однако опыт показал, что скорость звука при нормальных условиях равна  $v \approx 330 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Это отличие было объяснено тем, что в связи с быстрыми изменениями плотности и давления воздуха его температура изменяется и в формулу надо

ввести поправку:  $v = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}$ , где коэффициент  $\gamma$  для воздуха приблизительно равен 1,4.

С учетом этой поправки результаты теоретического расчета и эксперимента согласуются хорошо.

Заметим, что хотя волны сжатия и разрежения перемещаются в газе со скоростью  $v$ , никакого перемещения вещества в пространстве не происходит, так как в любой точке пространства расширение периодически сменяется сжатием и направление движения частиц каждый раз изменяется на противоположное.

**Пример 2**

Плоская звуковая волна задана уравнением

$$y = 3 \cdot 10^{-4} \cos(628t - x).$$

Чему равны амплитуда  $P_0$  и частота  $\nu$  колебаний, скорость  $v$  распространения волны, длина волны  $\lambda$ ?

**Решение**

Сравнив данное уравнение с уравнением волны

$$P = P_0 \cos \omega \left( t - \frac{x}{v} \right) = P_0 \cos \left( \omega t - \frac{\omega x}{v} \right)$$

получим:  $P_0 = 3 \cdot 10^{-4}$  Па;  $\nu = 100$  Гц;  $v = 628 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;  $\lambda = 6,28$  м.

## Пример 3

В трубу органа вдувается воздух при температуре  $t_1 = +7^\circ\text{C}$ , и при этом труба издает звук с частотой  $\nu_1 = 440$  Гц. При какой температуре вдуваемого воздуха эта же труба будет издавать звук с частотой  $\nu_2 = 466$  Гц?

Решение

Частота  $\nu$  звука пропорциональна скорости  $v$  распространения звука:  $\nu \sim v$ . (Длина волны, определяемая размерами труб органа, не изменяется).

В свою очередь, скорость звуковой волны, равная  $v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$ , пропорциональна корню квадратному из абсолютной температуры:  $v \sim \sqrt{T}$ .

Следовательно:

$$\frac{\nu_2}{\nu_1} = \frac{\sqrt{T_2}}{\sqrt{T_1}} \rightarrow T_2 = T_1 \left( \frac{\nu_2}{\nu_1} \right)^2 \approx 326 \text{ К.}$$

## Пример 4

Камертон, настроенный на ноту «ля» (440 Гц) подносят к высокому цилиндру с водой. При каком минимальном расстоянии  $l_{\min}$  до краев цилиндра громкость звучания будет максимальной? Опыт проводится при температуре  $17^\circ\text{C}$ .

Решение

При интерференции бегущей звуковой волны от камертона, отраженной от поверхности воды, образуется стоячая волна (рис. 377)  $l_{\min} = \frac{\lambda}{4}$ .

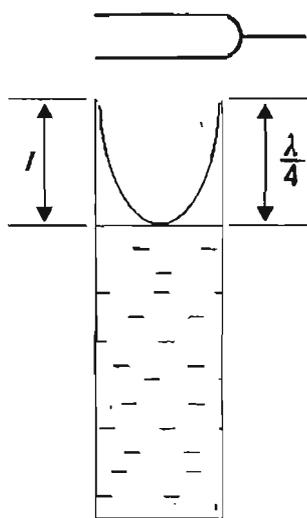


Рис. 377

Учтя, что  $\lambda = \frac{v}{\nu}$ , получим:  $l_{\min} = \frac{v}{4\nu}$ .

Скорость звука в воздухе равна:  $v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$ , где:

$\gamma$  — коэффициент для 2-х атомного газа, равен 1,4;

$R$  — универсальная газовая постоянная, равна

$$8,3 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}};$$

$M$  — молярная масса воздуха, равна  $29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ ;

$T$  — абсолютная температура, равна  $290$  К;

Следовательно:  $v = 341 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Отсюда:  $l_{\min} = \frac{341 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{4 \cdot 440 \text{ с}^{-1}} = 0,19 \text{ м.}$

## Пример 5

Как изменяется длина звуковой волны при переходе из воздуха в воду, если скорость распространения звука в воздухе равна  $340 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , а в воде

$$1480 \frac{\text{м}}{\text{с}}?$$

Решение

Длина звуковой волны равна:

$$\lambda = vT = \frac{v}{\nu}.$$

Так как частота колебаний не изменяется, то длина волны увеличивается в  $k$  раз,

$$\text{где } k = \frac{v_{\text{воды}}}{v_{\text{возд}}} = \frac{1480}{340} = 4,35.$$

## Решить самостоятельно

1. В каких упругих средах могут возникать поперечные волны? Поясните свой ответ.
2. В каких упругих средах могут возникать продольные волны? Поясните свой ответ.
3. Расстояние между смежными гребнями волн на озере равно  $5$  м, а период колебания частиц равен  $2$  с. Чему равна скорость распространения этих волн?
4. Составьте уравнение звуковой волны, распространяющейся в воздухе от камертона, который

колеблется с частотой 440 Гц. Запишите уравнение колебания давления на расстоянии 33 м от камертона, если давление около камертона равно  $10^{-4}$  Па. Скорость звука примите равной  $330 \frac{м}{с}$ .

- Чему равна скорость распространения звука в воздухе при температуре  $127^{\circ}C$ ?
- Зависит ли скорость распространения звука от атмосферного давления, если температура воздуха неизменна?
- Мелодия звучащего оркестра не изменяется при удалении от него. Можно ли на основании этого факта сделать вывод, что звук разной частоты распространяется с одинаковой скоростью, т. е. звуковой дисперсии не существует?

*Контрольные  
работы*

**Вариант 1**

- В каких направлениях совершаются колебания в продольной волне?
  - А. Во всех направлениях.
  - Б. Только по направлению распространения волны.
  - В. Только перпендикулярно распространению волны.
  - Г. По направлению распространения волны и перпендикулярно этому направлению.
- Какой стрелкой на рис. 378 правильно отмечена длина волны?

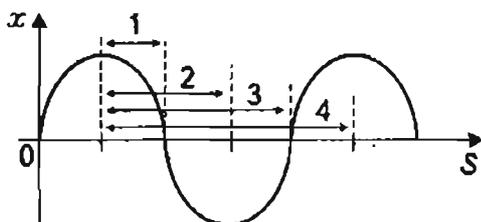


Рис. 378

- А. 1.
- Б. 2.
- В. 3.
- Г. 4.

- От чего зависит громкость звука?
  - А. От частоты колебаний.
  - Б. От амплитуды колебаний.
  - В. От частоты и амплитуды.

Г. Не зависит ни от частоты ни от амплитуды.

- Динамик подключен к выходу звукового генератора электрических колебаний. Частота колебаний 170 Гц. Определите длину звуковой волны, зная, что скорость звуковой волны в воздухе  $340 \frac{м}{с}$ ?

- А. 0,5 м.
- Б. 1 м.
- В. 2 м.
- Г. 57 800 м.

- Как зависит амплитуда вынужденных колебаний от частоты при постоянной амплитуде колебаний вынуждающей силы?

- А. Не зависит от частоты.
- Б. Непрерывно возрастает с увеличением частоты.
- В. Непрерывно убывает с увеличением частоты.
- Г. Сначала возрастает, достигает максимума, а потом убывает.

- Камертон, прикрепленный к резонансному ящику, ударили резиновым молоточком. К камертону поднесли по очереди два других камертона. Второй камертон в точности такой же, как и первый. Третий – настроен на меньшую частоту. Какой из камертонов начнет звучать с большей амплитудой?

- А. Второй.
- Б. Третий.
- В. Оба камертона.
- Г. Ни один из них.

**Вариант 2**

- В каких направлениях совершаются колебания в поперечной волне?

- А. Во всех направлениях.
- Б. Только по направлению распространения волны.
- В. Только перпендикулярно распространению волны.
- Г. По направлению распространения волны и перпендикулярно этому направлению.

- Какой стрелкой на рис. 382 правильно отмечена длина волны?

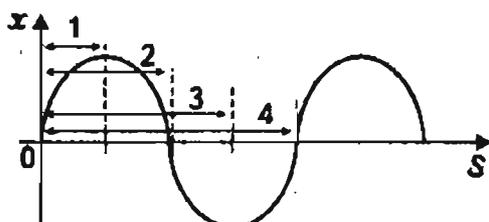


Рис. 379

- А. 1.                       Б. 2.  
 В. 3.                       Г. 3.

3. Чем определяется высота звука?

- А. Частотой колебаний.  
 Б. Амплитудой колебаний.  
 В. Частотой и амплитудой.  
 Г. Ни частотой ни амплитудой.

4. Динамик подключен к выходу звукового генератора электрических колебаний. Частота колебаний 680 Гц. Определите длину звуковой волны, зная, что скорость звуковой волны в воздухе

$$340 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

- А. 0,5.                       Б. 1 м.  
 В. 2 м.                       Г. 231 200 м.

5. Как зависит амплитуда вынужденных колебаний от частоты при постоянной амплитуде колебаний вынуждающей силы?

- А. Непрерывно возрастает с увеличением частоты.  
 Б. Непрерывно убывает с увеличением частоты.  
 В. Сначала возрастает, достигает максимума, затем убывает.  
 Г. Сначала убывает, достигает минимума, затем возрастает.

6. Камертон, прикрепленный к резонансному ящику, ударили резиновым молоточком. К камертону поднесли по очереди два других камертона. Второй камертон в точности такой же, как и первый. Третий – настроен на большую частоту. Какой из камертонов начнет звучать с большей амплитудой?

- А. Второй.                       Б. Третий.  
 В. Оба камертона.               Г. Ни один из них.

### Контрольная работа повышенного уровня сложности

#### Вариант 1

1. В бегущей волне частица А имеет направление скорости, указанное на рис. 380. В каком направлении движется волна?

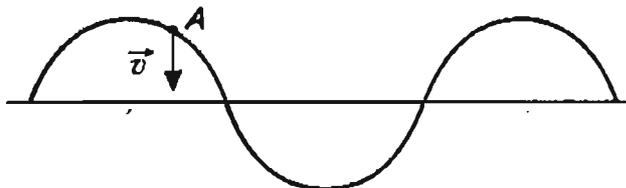


Рис. 380

2. Поперечная волна движется вправо. Определите направление движения точки А.  
 3. Изменяется ли мелодия, если источник звука слушателя погрузить в воду?  
 4. Кто в полете чаще машет крыльями: муха или комар?

#### Вариант 2

1. Почему пуля вылетает из ружья со свистом?  
 2. С помощью эхолота определяют глубину моря. Чему равна глубина моря, если ультразвуковой импульс эхолота отразился от дна моря и был зафиксирован приемником через 1 с? Скорость звука в воде принять равной  $1480 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .  
 3. В волновой ванне установлен вибратор, который возбуждает на поверхности воды волны с частотой  $\nu$ . Как изменится длина волны, если частоту увеличить в два раза?  
 4. На рис. 381, а, б, представлены график колебаний частиц в волне и график самой волны. Чему равна скорость распространения волны?

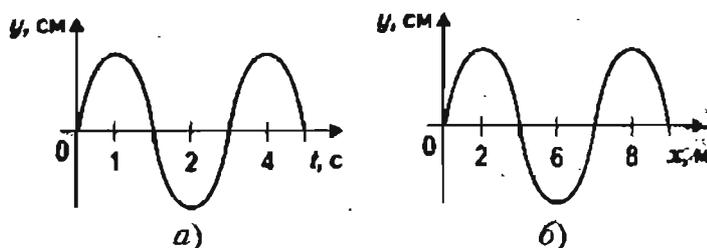


Рис. 381

# *Молекулярная физика. Термодинамика*

- ◆ Первоначальные сведения о строении вещества
- ◆ Тепловые явления
- ◆ Кинетическая теория газов
- ◆ Основы термодинамики



# Первоначальные сведения о строении вещества

Тепловое движение  
Строение и свойства тел

## Изучив эту тему,

- вы познакомитесь с основными положениями атомно-молекулярного учения о строении вещества, с явлением диффузии и с броуновским движением, с поверхностным натяжением и его проявлением — капиллярностью, а также с законом Гука;
- узнаете основные свойства вещества в различных агрегатных состояниях, изучите разные виды деформаций и узнаете об их применении;
- поймете сходства и различия агрегатных состояний вещества; научитесь определять относительную влажность воздуха, проводить простые эксперименты и решать задачи

## Основные понятия:

- ♦ Молекула ♦ Диффузия ♦ Броуновское движение ♦ Агрегатное состояние ♦ Поверхностное натяжение ♦ Относительная влажность воздуха ♦ Кристалл ♦ Аморфное тело ♦ Кристаллическая решетка ♦ Элементарная ячейка ♦ Анизотропность ♦ Изотропность ♦ Модуль Юнга

### *Конспект.*

### *Таблицы. Схемы*

В основе атомно-молекулярного учения о строении вещества лежат три положения:

1. Все вещества в любом агрегатном состоянии имеют дискретное строение, т. е. состоят из отдельных обособленных частиц (атомов, молекул и др.)
2. Частицы вещества находятся в состоянии непрерывного хаотического движения.

3. Между частицами одновременно действуют силы взаимного притяжения и отталкивания, зависящие от расстояния между ними.

**Молекула** — наименьшая частица вещества, обладающая всеми его основными химическими свойствами. Молекулы состоят из атомов. Частицы вещества (атомы, молекулы и др.) непрерывно, хаотически движутся.

Беспорядочное движение большой совокупности частиц (атомов, молекул и др.), из которых состоит тела, представляет собой **тепловое движение**. Доказательством непрерывного хаотического движения частиц вещества служат явление диффузии и броуновское движение.

**Диффузия** — взаимное проникновение соприкасающихся веществ друг в друга, происходящее вследствие беспорядочного движения частиц вещества (молекул, атомов и др.). Слово диффузия происходит от латинского слова *diffusio*, означающего *распространение, растекание*. Диффузия происходит в газах, жидкостях и твердых телах.

**Броуновское движение** — хаотическое движение мелких частиц под действием молекул окружающей среды. Броуновское движение доказывает факт

существования молекул и их непрерывное хаотическое движение.

Вещества могут находиться в различных агрегатных состояниях.



**СХОДСТВА И РАЗЛИЧИЯ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВ**

	Соотношение расстояний между частицами с их размерами	Взаимодействие частиц	Характер движения частиц	Свойства вещества
Газообразное	$R \gg d_0$	Силы взаимодействия чрезвычайно малы	Хаотическое движение: частицы свободно движутся среди других частиц	<b>ГАЗЫ</b>
				1. Не сохраняют ни формы ни объема. Могут неограниченно расширяться 2. Легко сжимаемы и упруги
Жидкое	$R \approx d_0$	Проявляются силы взаимного притяжения и отталкивания	Колебательно - поступательное движение	<b>ЖИДКОСТИ</b>
				1. Не сохраняют объем, но легко меняют свою форму 2. Плохо сжимаемы. 3. Текучи
Твердое	$R = d_0$	Проявляются силы взаимного притяжения и отталкивания	Колебательное движение частиц около положения равновесия	<b>ТВЕРДЫЕ ТЕЛА</b>
				1. Сохраняют форму и объем 2. Упруги 3. Пластичны



Вода в природе одновременно встречается в трех агрегатных состояниях (рис. 1): *твердом (лед), жидком (вода) и газообразном (водяной пар)*.

Свойство поверхности жидкости сокращаться рассматривают как свидетельство существования *силы поверхностного натяжения*. Сила поверхностного натяжения, приходящаяся на единицу длины границы поверхностного слоя жидкости, называется *поверхностным натяжением*.

Поверхностное натяжение обозначается буквой греческого алфавита  $\sigma$  (читается *сигма*). Расчетная формула:

$$\sigma = \frac{F}{l}$$

$F$  — сила поверхностного натяжения (направлена внутрь жидкости и перпендикулярна ее поверхности);

$l$  — длина границы поверхностного слоя жидкости.

$$[\sigma] = \frac{H}{м}$$

Поверхностное натяжение жидкости зависит от конкретного газа, с которым она образует поверхность раздела. Некоторые значения поверхностного натяжения жидкостей на границе с воздухом приведены в табл. 1 (см. *Справочный раздел*).

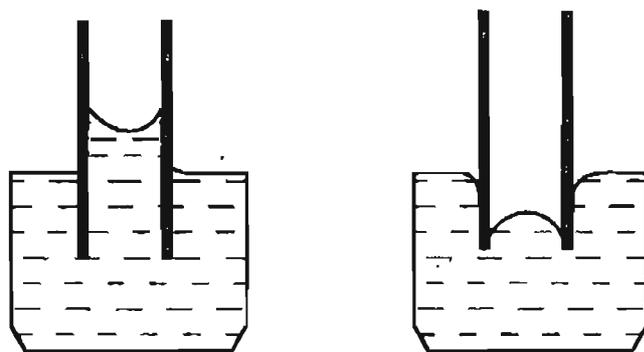
Одно из наиболее известных проявлений поверхностного натяжения — способность жидкости подниматься (или опускаться) по внутренней стороне узкой трубки — *капиллярность*. Высота подъема или опускания жидкости в капиллярных трубках (рис. 2) рассчитывается по формуле:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$$

$\sigma$  — поверхностное натяжение жидкости;

$\rho$  — плотность жидкости;

$r$  — радиус капиллярной трубки.



Вогнутый мениск

Выпуклый мениск

Рис. 2. Капиллярный подъем и опускание жидкости

Атмосферный воздух представляет собой смесь различных газов: азота, кислорода, инертных газов, углекислого газа, водяных паров и примесей. Каждый из них вносит свой вклад в суммарное давление, производимое земной атмосферой на тела. Давление, которое производил бы водяной пар, если бы все остальные газы отсутствовали, называется *парциальным давлением водяного пара*. Его принимают за один из показателей влажности воздуха и выражают в единицах давления: Па или мм рт. ст. Однако по парциальному давлению водяного пара нельзя судить о том, насколько он близок к насыщению. Водяной пар, содержащийся в воздухе, обычно ненасыщенный, и его парциальное давление ниже давления насыщенного пара при данной температуре. Для количественной характеристики влажности воздуха введена специальная величина — *относительная влажность воздуха*.

Относительной влажностью воздуха называется величина, равная отношению парциального давления водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, к давлению насыщенного пара при той же температуре, выраженная в процентах.

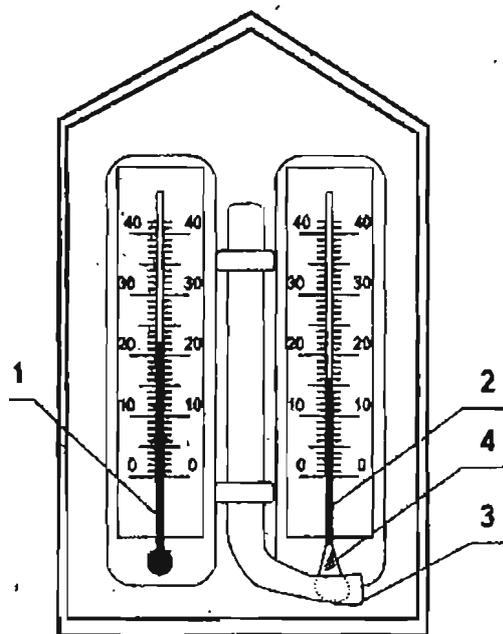
$$\varphi = \frac{p}{p_0} \cdot 100\%$$

$\varphi$  — относительная влажность воздуха ( $\varphi$  — буква греческого алфавита);

$p$  — парциальное давление водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре;

$p_0$  — давление насыщенного пара при той же температуре.

Для измерения относительной влажности воздуха существуют различные приборы: психрометры, гигрометры (волосные, пленочные, полупроводниковые). По шкалам гигрометров относительная влажность определяется непосредственно в процентах. Наиболее распространенный прибор для измерения температуры и влажности воздуха — психрометр (от греческих слов *psychrós*, означающего *холодный* и *metrḗō* — *измеряю*) — рис. 3.

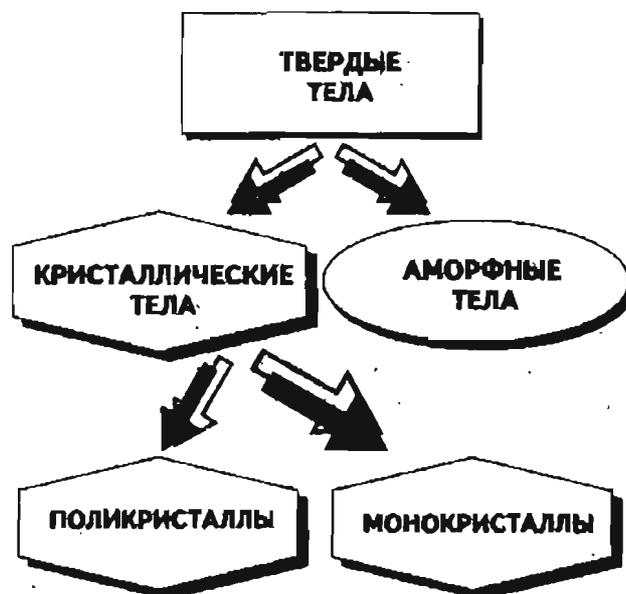


1 — сухой термометр; 2 — влажный термометр; 3 — резервуар с водой; 4 — полоска ткани, опущенная в воду

Рис. 3. Внешний вид психрометра

Для определения относительной влажности воздуха используют психрометр и психрометрическую таблицу (см. *Справочный раздел*, табл. 2).

**Кристаллы** (от греческого слова *krýstallos*, означающего *лед*) — твердые тела, обладающие периодической структурой и имеющие правильную геометрическую форму.

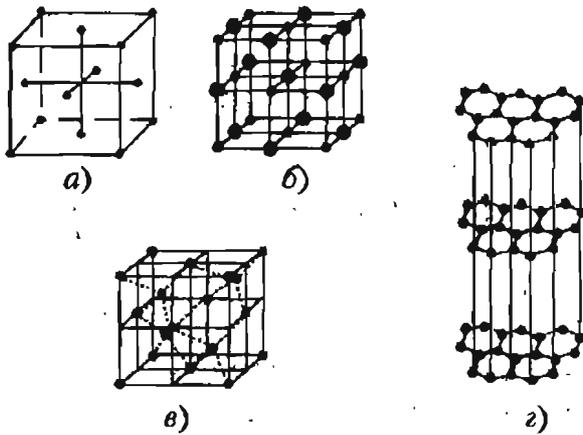


У тел, находящихся в **аморфном** состоянии (от греческого слова *ámorphos*, означающего *бесформенный*), отсутствует строгий порядок в расположении частиц вещества.

Кристаллическому состоянию вещества присуще **упорядоченное** расположение частиц (атомов, молекул, ионов), характеризующееся повторяемостью в трех измерениях, — **кристаллическая решетка**. Она представляет собой пространственную «сетку», узлы которой совпадают с положением центров атомов (молекул, ионов). В основе кристаллической решетки лежит **элементарная ячейка** — фигура наименьшего размера, последовательным переносом которой можно построить весь кристалл. На рис. 4 изображены элементарные ячейки кристаллов.

**Монокристаллы** — **анизотропны**. Анизотропными называются тела, обладающие различными свойствами в разных направлениях.

**Поликристаллические** и **аморфные** тела — **изотропны**. Изотропными называются тела, физические свойства которых во всех направлениях одинаковы.



а) медь (Cu); б) хлорид натрия (NaCl);  
в) алмаз; г) графит

Рис. 4. Элементарные ячейки кристаллов

Изменение формы и размеров тела под действием внешней силы называется **деформацией**.

Свойство тел изменять форму и размеры под воздействием внешней нагрузки и восстанавливать исходную конфигурацию после прекращения внешней силы — **упругость**. Деформации, которые

полностью исчезают после прекращения действия внешней силы, называются **упругими**.

Свойство тел сохранять часть деформации при снятии внешней нагрузки — **пластичность** (от греческого слова *plastikos*, означающего *годный для лепки, податливый*). Деформации, которые сохраняются после прекращения действия внешней силы, называются **пластическими**.

При малых упругих деформациях ( $\Delta l \ll l_0$ ) механическое напряжение прямо пропорционально относительному удлинению. Эта зависимость, называемая **законом Гука**, записывается так:

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

$E$  — модуль упругости или модуль Юнга (от латинского слова *modulus*, означающего *мера*). Он характеризует материал, из которого сделано тело.  $[E] = \text{Па}$ ;

$\epsilon$  — относительное удлинение образца;

$\epsilon > 0$  — для деформации растяжения;

$\epsilon < 0$  — для деформации сжатия.

### РАЗЛИЧНЫЕ ВИДЫ ДЕФОРМАЦИЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Вид деформации	Изображение	Применение (учет, проявление) на практике
Растяжение		Растяжение испытывают тросы подъемных кранов, канатных дорог, буксирные тросы, струны музыкальных инструментов
Сжатие		Сжатию подвергаются колонны, стены, фундаменты зданий
Сдвиг		Сдвиговые нагрузки испытывают заклепки и болты, соединяющие металлические конструкции. Деформация сдвига наблюдается при резании ножницами бумаги, картона, листового железа
Изгиб		Деформацию изгиба испытывают балки перекрытий в зданиях, мостах
Кручение		Деформация кручения возникает при завинчивании гаек, при работе валов машин

Так как модуль упругости зависит от температуры, структуры, химического состава, термообработки, радиоактивного облучения и многих других факторов, то в таблице 3 (см. *Справочный раздел*) значения модуля упругости указаны в некоторых пределах.

*Тренировки по  
решению задач*

Спичка длиной 4 см плавает на поверхности воды при комнатной температуре. Если по одну сторону от спички с помощью пипетки ввести мыльный раствор, то спичка придет в движение. В какую сторону будет перемещаться спичка? какова величина силы, действующая на спичку? Влиянием силы тяжести пренебречь.

Дано:  $l = 4 \text{ см} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$

$$\sigma_1 = 72,8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

$$\sigma_2 = 40 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

$F = ?$

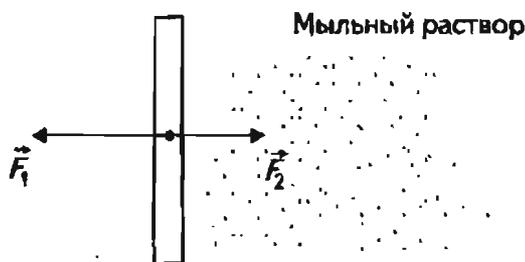


Рис. 5. Силы, действующие на спичку

**Решение**

На рис. 5 изображены силы поверхностного натяжения, действующие на спичку со стороны воды ( $F_1$ ) и мыльного раствора ( $F_2$ ).

Найдем равнодействующую силу, действующую на спичку:

$$F = F_1 - F_2 \quad (1)$$

$$F_1 = \sigma_1 \cdot l \quad (2)$$

$$F_2 = \sigma_2 \cdot l \quad (3)$$

Из (1), (2) и (3):

$$F = l(\sigma_1 - \sigma_2);$$

$$[F] = \text{м} \left( \frac{\text{Н}}{\text{м}} - \frac{\text{Н}}{\text{м}} \right) = \text{м} \cdot \frac{\text{Н}}{\text{м}} = \text{Н}.$$

$$F = 4 \cdot 10^{-2} (72,8 \cdot 10^{-3} - 40 \cdot 10^{-3}) =$$

$$= 4 \cdot 32,8 \cdot 10^{-5} \approx 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ (Н)}.$$

Ответ: спичка будет двигаться в сторону чистой воды под действием силы, равной  $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$ .

*Лабораторные  
работы*

**1. Наблюдение диффузии веществ**  
(выполняется в классе)

Цель работы: пронаблюдать диффузию молекул йода и аммиака.

Приборы и материалы: цилиндрический сосуд, узкая полоска фильтровальной бумаги, пропитанная смесью крахмального клейстера с раствором фенолфталеина; кристаллы йода; крышка; кусок ваты, пропитанный нашатырным спиртом.

**Ход работы**

1. Соберите установку согласно рис. 6: возьмите высокий цилиндрический сосуд (1); опустите в него узкую полоску фильтровальной бумаги (2), пропитанную смесью крахмального клейстера с раствором фенолфталеина; на дно сосуда поместите кристаллы йода (3); сосуд плотно закройте крышкой (4), к которой подвешена вата (5), пропитанная нашатырным спиртом. Кратко опишите свои наблюдения.

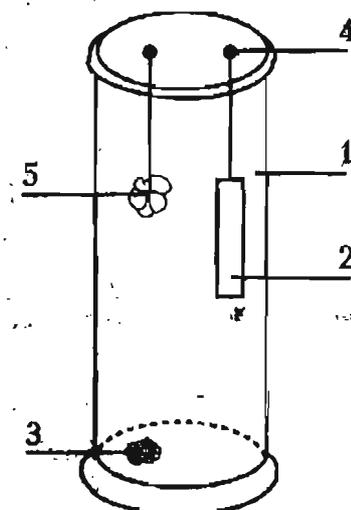
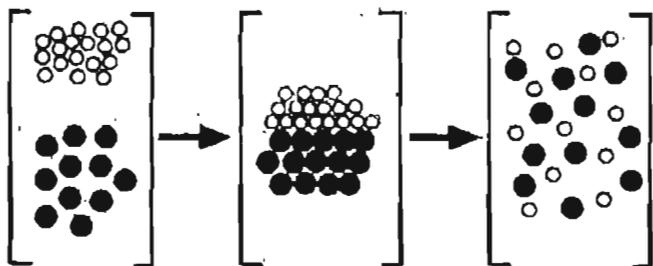


Рис. 6. Схема опыта по наблюдению диффузии веществ

2. Объясните результаты эксперимента, используя схему, представленную на рис. 7.



○ — молекула аммиака; ● — молекула иода

Рис. 7. Схема диффузии молекул иода и аммиака

3. Какие методы изучения явления диффузии использовали вами в этой работе?

## 2. Наблюдение взаимодействия различных веществ (выполняется дома)

Цель работы: убедиться в существовании взаимодействия частиц вещества.

Приборы и материалы: кусок пластилина; две парафиновые свечи; спички; два предметных стекла (предметные стекла возьмите у учителя); стакан с водой; пипетка; ластик.

Ход работы

1. Разделите кусок пластилина на две одинаковые части, а затем прижмите их друг к другу. Что вы наблюдаете?
2. Приведите в соприкосновение две парафиновые свечи. Соединились они или нет? Почему?
3. Оплавьте конец одной свечи на пламени спички. Соедините свечи. Что вы наблюдаете? Почему?
4. Сложите два сухих предметных стекла. Прижмите их друг к другу. Что вы наблюдаете?
5. С помощью пипетки наберите воду из стакана. Смочите одно из стекол водой (капните из пипетки несколько капель) и опять прижмите предметные стекла друг к другу. Что вы наблюдаете? Почему?
6. Сожмите пальцами ластик. Что вы ощущаете? Почему ластик восстанавливает свою первоначальную форму после прекращения сжатия?

## 3. Изменение поверхностного натяжения воды (выполняется в классе)

Цель работы: убедиться в существовании поверхностного натяжения жидкости.

Приборы и материалы: три кристаллизатора; сосуд с дистиллированной водой; мыльный раствор; раствор сахара в воде; две чистые пипетки; две тонкие лучинки (спички «без головок»); пробирка с крошками пробки.

Ход работы

1. Налейте в один из кристаллизаторов дистиллированную воду. На ее поверхность насыпьте крошки натертой пробки так, чтобы они ровным слоем покрыли поверхность. С помощью чистой пипетки введите на середину поверхности воды небольшую каплю мыльного раствора. Нарисуйте то, что вы наблюдаете. Используя табличные данные, объясните причину быстрого перемещения частичек пробки.
2. Налейте во второй кристаллизатор дистиллированную воду. На середину ее поверхности положите небольшую лучинку. С помощью пипетки введите вблизи лучинки раствор мыла. Как при этом поведет себя лучинка? Ответ обоснуйте.
3. Налейте в третий кристаллизатор дистиллированную воду. На середину ее поверхности положите небольшую лучинку. С помощью другой пипетки введите вблизи лучинки раствор сахара. Как при этом она себя поведет? Ответ обоснуйте.

Результаты наблюдений оформите в виде таблицы.

№ опыта	Схематический рисунок	Объяснение причины наблюдаемого

## 4. Наблюдение капиллярного поднятия жидкости (выполняется в классе)

Цель работы: убедиться в существовании капиллярного подъема жидкости.

Приборы и материалы: высокий стакан с подкрашенной водой; две чистые стеклянные трубки с разными диаметрами внутреннего канала; две стеклянные пластинки одинакового размера; спичка.

**Ход работы**

1. В стакан с подкрашенной водой опустите две чистые стеклянные трубки. Обратите внимание на форму мениска. Сравните высоту поднятия воды в трубках. Как зависит высота поднятия жидкости от диаметра внутреннего канала?
2. Возьмите две стеклянные пластинки и выполните следующие задания.
  - 1) Расположите пластинки параллельно друг другу, как показано на рис. 8 а. Обратите внимание на уровень воды между пластинками. В таблице (п. 4) изобразите форму поверхности жидкости вблизи пластинок.
  - 2) Аккуратно приблизьте пластинки друг к другу, как показано на рис. 8 б. Обратите внимание на уровень жидкости между пластинками. В таблице (п. 4) изобразите уровень жидкости и форму поверхности жидкости вблизи пластинок.
  - 3) Удалите пластинки друг от друга на расстояние, большее, чем в первом опыте (рис. 8 в). Обратите внимание на уровень жидкости между пластинками. В таблице (п. 4) изобразите уровень жидкости между пластинками и форму поверхности жидкости вблизи пластинок.

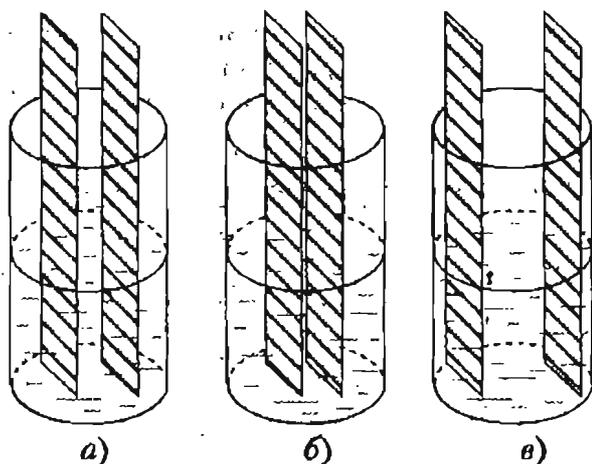


Рис. 8. Схема эксперимента

- 4) Сравните три рисунка. Какой вывод вы можете сделать из анализа проведенного эксперимента?
3. (**Уровень В**). Две стеклянные пластинки расположите так, как показано на рис. 9 а. Угол

между ними должен быть мал. Аккуратно опустите обе пластинки в стакан с подкрашенной водой. Обратите внимание на форму мениска. Объясните наблюдаемое явление.

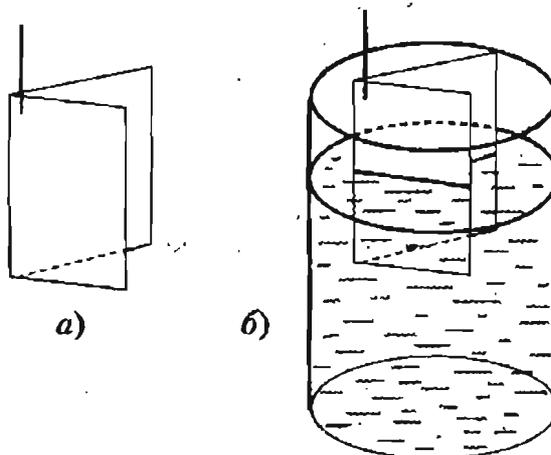


Рис. 9. Схема эксперимента

4. Результаты наблюдений оформите в виде таблицы.

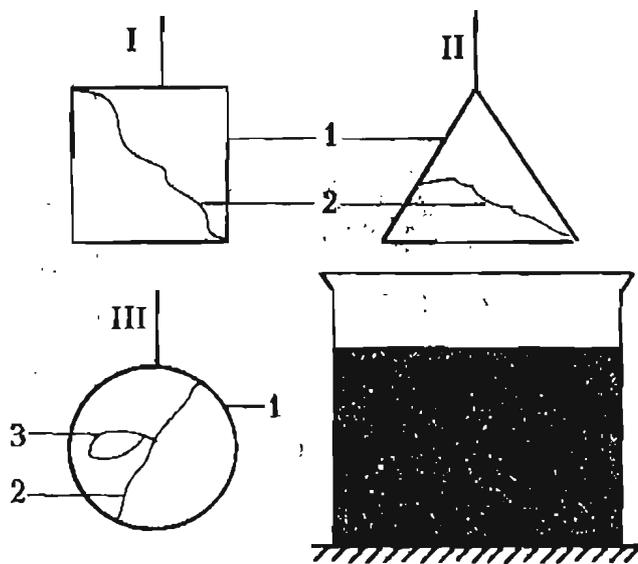
№ опыта	Схематический рисунок	Объяснение причины наблюдаемого

*Экспериментальные задания*

**1. Образование мыльных пленок на каркасах**

Приборы и материалы: проволочные каркасы разной конфигурации; стакан с мыльным раствором и игла (рис. 10).

1. Опустите в мыльный раствор:
  - а) каркас I. Вынув его из раствора, проколите иглой пленку в верхней части;
  - б) каркас II. Вынув его из раствора проколите иглой пленку в нижней части;
  - в) каркас III. Вынув его из раствора, проколите иглой пленку внутри нитяной петли. Повторите опыт еще раз, но проколов иглой пленку в правой части.
2. Для каждого опыта сделайте зарисовки расположения шелковой нити после прокалывания.



1 — каркас; 2 — шелковая тонкая нить; 3 — петля

Рис. 10. Проволочные каркасы различной конфигурации

3. В существовании какой силы вы убедились?

## 2. Наблюдение свойств жидкостей

Приборы и материалы: прозрачный цилиндр с поршнем (например медицинский шприц), сосуд с водой.

1. Возьмите прозрачный цилиндр с поршнем. При закрытом выпускном отверстии попробуйте вдвинуть поршень, сжав воздух. Что вы наблюдаете и ощущаете?
2. Цилиндр заполните водой и попробуйте вдвинуть поршень, сжав воду. Что вы ощущаете?
3. Какое свойство жидкости вы наблюдали?

## 3. Изучение образцов твердых тел

Приборы и материалы: лупа, коллекция минералов и горных пород, металлов и сплавов; пробирка с песком.

1. Осмотрите внешний вид минералов, горных пород, металлов и сплавов. Обратите внимание на их форму, цвет и блеск.
2. С помощью лупы рассмотрите структуру образцов горных пород (гранита, песчаника, известняка, мрамора и др.), металлов, песчинок.
3. Результаты наблюдений запишите в тетрадь.

## 4. Получение кристаллов из паров

Приборы и материалы: пробирка, порошок нашатыря, спиртовка, лупа.

1. Насыпьте в пробирку немного порошка нашатыря и осторожно введите пробирку в пламя спиртовки. Пробирку держите наклонно, открытым концом от себя. Через некоторое время прекратите нагревание.
2. Рассмотрите внимательно с помощью лупы то, что образовалось на стенках пробирки.
3. Объясните наблюдаемое явление. Зарисуйте результаты наблюдений в тетради.

## 5. Получение кристаллов льда

Приборы и материалы: лупа, небольшой кусок стекла, вода.

1. На небольшое стекло поместите большую каплю воды. Быстро охладите стекло, прижав его к снегу или поместив в морозильную камеру холодильника. С помощью лупы рассмотрите то, что получилось на стекле. Сделайте зарисовки. Объясните причину наблюдаемого явления.
2. Сравните свои зарисовки с фотографиями снежинок, приведенными на рис. 11.

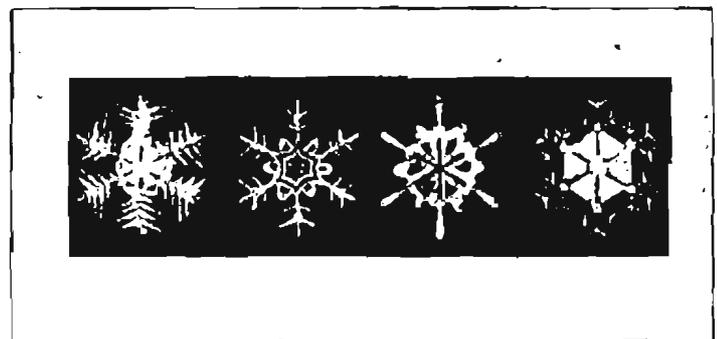


Рис. 11. Фотографии снежинок

*Самостоятельная  
работы*

### Самостоятельная работа 1.1

(выполняется в классе, рассчитана на 20 минут)

1. Почему аромат цветов мы чувствуем на расстоянии?
2. Морское животное кальмар при нападении на него выбрасывает темно-синюю жидкость. Почему пространство, заполненное этой жидкостью...

стью, через некоторое время становится прозрачным даже в спокойной воде?

- Почему не рекомендуется мокрую ткань, окрашенную в черный цвет, оставлять на длительное время в соприкосновении с белой тканью?
- Какую роль играет явление диффузии в очистке воздуха от выбросов газов из дымовых труб, отработанных газов транспортных средств и других вредных для здоровья веществ?
- Почему для разделения смоченных водой листов бумаги требуется прилагать более значительные усилия, чем при перелистывании сухих страниц книги?
- Почему, разломив карандаш или линейку, мы не можем соединить их части так, чтобы предметы вновь стали целыми?
- Объем алюминиевого цилиндра трудно изменить. Чем это можно объяснить?
- На рис. 12 изображены положения трех броуновских частиц. На каком из рисунков — 12 а, 12 б или 12 в показано движение более крупной частицы?

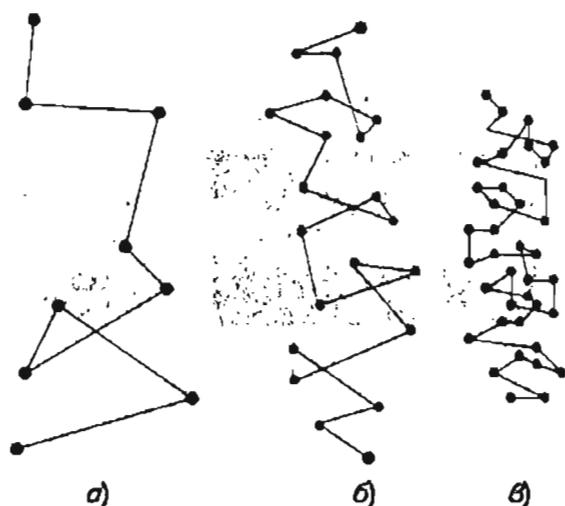


Рис. 12. Схемы движения броуновских частиц

### Самостоятельная работа 1.2

(выполняется дома, рассчитана на 10 минут)

- На рис. 13 изображена молекула воды. Обозначьте названия атомов, из которых состоит молекула.

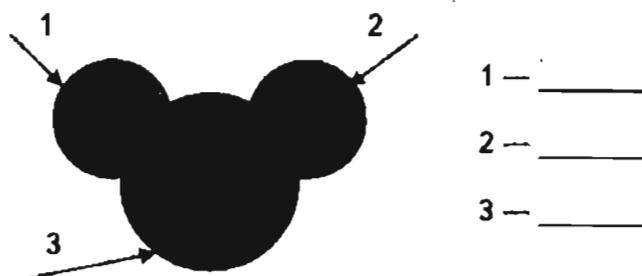


Рис. 13. Модель молекулы воды

- Отметьте неверные утверждения.
  - А. Молекулы одного и того же вещества различны.
  - Б. Молекулы одного и того же вещества одинаковы.
  - В. При нагревании тела молекулы вещества увеличиваются в размерах.
  - Г. При нагревании тела увеличиваются расстояния между молекулами.
- Отметьте неверное утверждение.
 

В процессе диффузии...

  - 1) молекулы (атомы) одного вещества проникают в молекулы (атомы) другого вещества.
  - 2) молекулы (атомы) одного вещества проникают в межмолекулярное (межатомное) пространство другого вещества.
- Выберите наиболее полный ответ.
 

Диффузия происходит...

  - А. только в газах.
  - Б. только в жидкостях.
  - В. только в твердых телах.
  - Г. в газах, жидкостях и твердых телах.

### Самостоятельная работа 2.1

(выполняется в классе, рассчитана на 40 минут)

- Укажите направление действия силы поверхностного натяжения мыльной пленки в точках 1 и 2 (рис. 14).

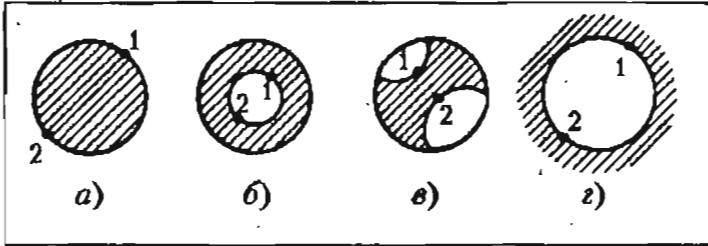


Рис. 14. Схема эксперимента с мыльными пленками

- В сосуд налили глицерин. На поверхность глицерина положили спичку без головки длиной 3 см. Чему равна сила поверхностного натяжения, действующая на спичку? Необходимые данные найдите в таблице 1 справочного раздела.
- Лучинка длиной 5 см плавает на поверхности воды при комнатной температуре. Если по одну сторону от лучинки с помощью пипетки ввести мыльный раствор, то лучинка приходит в движение. Какова величина силы, действующей на лучинку? В какую сторону она будет двигаться? Решение сопроводите рисунком.
- (Уровень Б). На рис. 15 изображен один из опытов с мыльными пленками (каркас с подвижной перекладиной  $AB$ ). Используя рисунок, выполните следующие задания:
  - укажите направление силы, действующей на перекладину  $AB$  со стороны мыльной пленки (рис. 15 а);
  - рассчитайте силу, с которой мыльная пленка действует на перекладину  $AB$  длиной 5 см;
  - какую работу надо совершить, чтобы переместить перекладину на 1 см (рис. 15 б)?

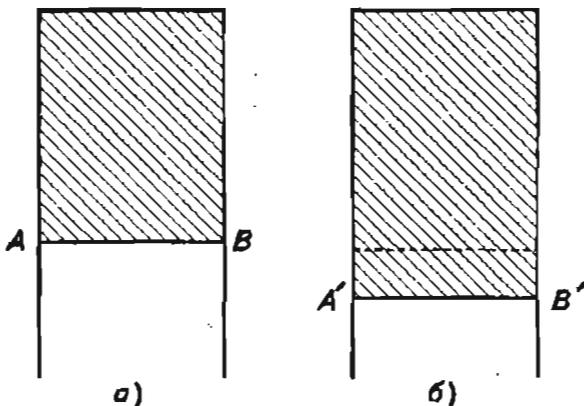


Рис. 15. Схема опыта с мыльной пленкой

**Самостоятельная работа 2.2**

(выполняется дома, рассчитана на 15 минут)

- В сосуд налили касторовое масло. На поверхность масла положили лучинку длиной 5 см. Чему равна сила поверхностного натяжения, действующая на лучинку? Необходимые данные найдите в таблице 1 справочного раздела.
- На спичку длиной 3 см действует сила поверхностного натяжения, равная  $1,2 \cdot 10^{-3}$  Н. На поверхности какой жидкости находится спичка?

**Самостоятельная работа 3.1**

(выполняется в классе, рассчитана на 20 минут)

- Метиловый спирт поднялся по капиллярной трубке на 22 мм. Рассчитайте радиус трубки.
- Для определения поверхностного натяжения воды в нее опустили две стеклянные трубки с радиусами внутреннего канала  $r_1 = 0,25$  мм и  $r_2 = 0,5$  мм. Вода поднялась в одной трубке выше, чем в другой, на 30 мм. Вычислите поверхностное натяжение воды.

**Самостоятельная работа 3.2**

(выполняется дома, рассчитана на 15 минут)

- Ответьте на вопросы.
  - Почему трудно вытирать мокрые руки шерстяной или шелковой тканью?
  - Почему руки, смоченные машинным маслом, трудно смыть водой, а керосином — легче?
  - Почему перед пайкой тщательно очищают поверхности деталей?
  - Чтобы стены здания не были сырými, фундамент застилают специальными влагозащитными покрытиями. Почему это помогает избавиться от сырости?
- Рассчитайте высоту подъема воды в смачиваемой ею капиллярной трубке радиусом 1,5 мм.

**Самостоятельная работа 4.1**

(выполняется в классе, рассчитана на 30 минут)

- Используя показания термометров (см. рис. 3) и психрометрическую таблицу, определите относительную влажность воздуха.

2. Используя психрометрическую таблицу (*Справочный раздел*, табл. 2), определите недостающие параметры:

	$t_{\text{сух}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{вл}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\Phi, \%$
1	26	18	—	—
2	20	—	—	83
3	—	—	5	35
4	—	24	2	—

3. (Уровень В). В комнате при температуре  $20^\circ\text{C}$  относительная влажность составляет 20%. Сколько нужно испарить воды для увеличения влажности до 50%, если объем комнаты  $40\text{ м}^3$ ?

### Самостоятельная работа 4.2

(выполняется дома, рассчитана на 10 минут)

1. Влажный термометр психрометра показывает  $18^\circ\text{C}$ , а сухой —  $22^\circ\text{C}$ . Какова относительная влажность воздуха в помещении?
2. При температуре воздуха  $26^\circ\text{C}$  влажный термометр психрометра показывает  $22^\circ\text{C}$ . Определите показание влажного термометра психрометра при понижении температуры воздуха до  $16^\circ\text{C}$ , если относительная влажность воздуха не изменится.
3. В теплице для прорастания огурцов и дынь нужно поддерживать температуру  $32^\circ\text{C}$  и относительную влажность 90%. Выполняется ли это требование, если влажный термометр психрометра показывает  $29^\circ\text{C}$ , а сухой —  $30^\circ\text{C}$ ?

### Самостоятельная работа 5.1

(выполняется в классе, рассчитана на 35 минут)

1. На рисунке (рис. 16) приведен график зависимости механического напряжения ( $\sigma$ ) образца от относительного удлинения  $\epsilon$ .
  - 1) Определите значение модуля упругости для данного материала.
  - 2) Из какого материала изготовлен образец?
  - 3) Напишите уравнение зависимости механического напряжения от относительного удлинения  $\sigma = \sigma(\epsilon)$ , которую выражает данный график.

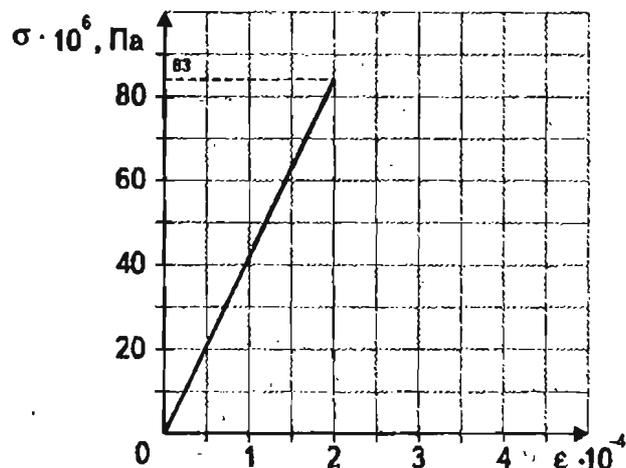


Рис. 16

2. На рисунке (рис. 17) изображены графики зависимости механического напряжения от относительного удлинения для двух образцов. Используя график  $\sigma = \sigma(\epsilon)$  и табличные данные, определите модуль упругости каждого из образцов. Из каких веществ изготовлены образцы?

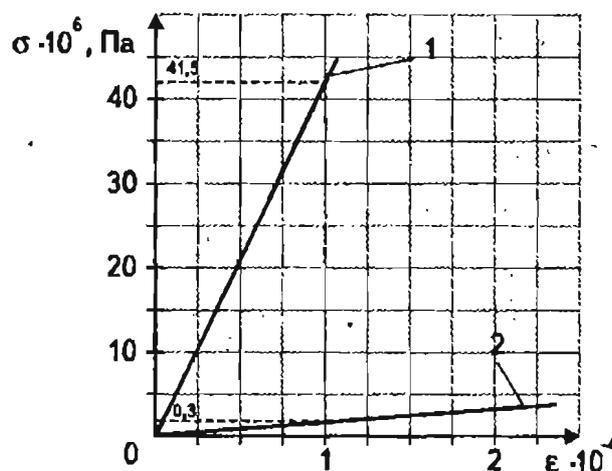


Рис. 17

3. На рисунке (рис. 18) приведен график зависимости механического напряжения  $\sigma$  от относительного удлинения  $\epsilon$ .
  - 1) Определите значение модуля упругости для данного материала.
  - 2) Из какого материала изготовлен образец?
  - 3) Напишите уравнение зависимости механического напряжения от относительного удлинения  $\sigma = \sigma(\epsilon)$ , которую выражает данный график.

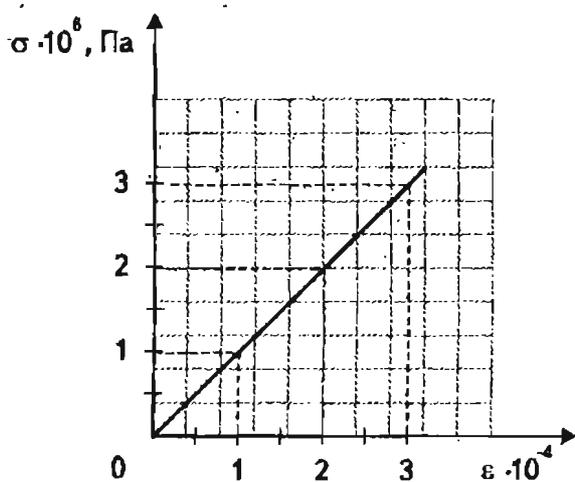


Рис. 18

**Самостоятельная работа 5.2**

(выполняется дома, рассчитана на 15 минут)

1. На рисунке (рис. 19) представлен график зависимости механического напряжения, возникающего в бетонной свае, от ее относительного сжатия. Используя график, рассчитайте модуль упругости бетона. Сравните полученный результат с табличным значением.

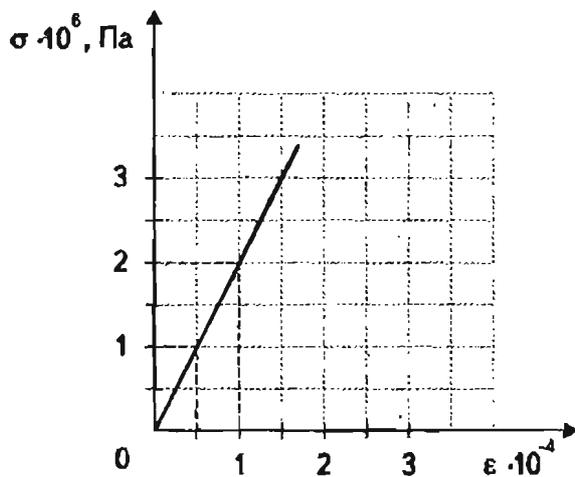


Рис. 19

2. На рисунке (рис. 20) дан график зависимости механического напряжения образца от относительного удлинения. Определите значение модуля упругости для данного материала. Из какого материала изготовлен образец? Напишите уравнение зависимости  $\sigma = \sigma(\epsilon)$ , которую выражает данный график.

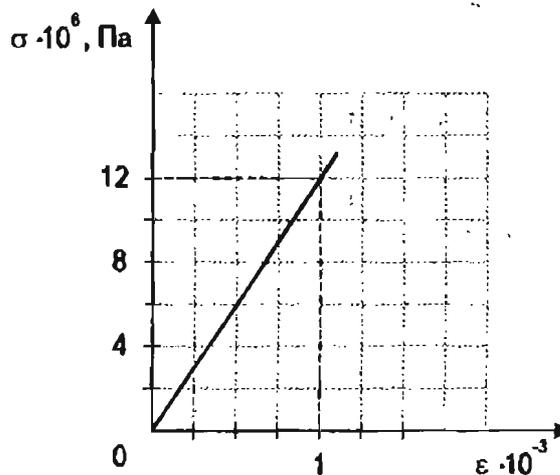


Рис. 20

*Контрольные работы***Контрольная работа 1**

(уровень А, рассчитана на 15 минут)

**Вариант 1**

1. Приведите примеры опытов или явлений, которые служат экспериментальным доказательством атомно-молекулярного учения о строении вещества.
2. Назовите основные свойства газов.

**Вариант 2**

1. В чем сходство между броуновским движением частиц и диффузией?
2. Назовите различия в расположении частиц в газообразном и твердом состояниях вещества.

**Контрольная работа 2**

(уровень Б, рассчитана на 15 минут)

**Вариант 1**

1. Объясните причину того, что газ способен занимать весь предоставленный ему объем.
2. В чем различие между броуновским движением частиц и диффузией?

**Вариант 2**

1. На основе атомно-молекулярного учения о строении вещества объясните плохую сжимаемость жидкостей.

2. Какова причина броуновского движения частиц?

**Контрольная работа 3**

(уровень Б, рассчитана на 40 минут)

**Вариант 1**

1. На основе атомно-молекулярного учения о строении вещества объясните упругие свойства твердых тел.
2. На середину кристаллизатора с дистиллированной водой опустили спичку без головки длиной 4 см. С помощью пипетки ввели вблизи спички 63%-ный раствор сахара. Спичка стала приближаться. Рассчитайте силу поверхностного натяжения, действующую на спичку со стороны сахара.
3. На рисунке (рис. 21) изображен график зависимости механического напряжения образца  $\sigma$  от относительного удлинения  $\epsilon$ . Определите модуль упругости (модуль Юнга) для данного материала. Из какого вещества изготовлен образец?

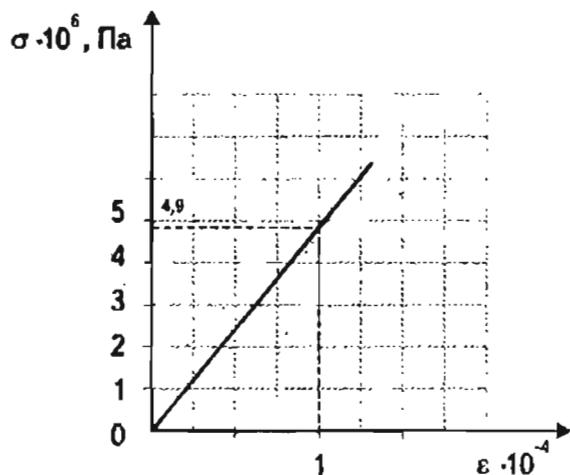


Рис. 21

**Вариант 2**

1. Объясните причину капиллярного поднятия воды в чистой стеклянной трубке.
2. На середину кристаллизатора с дистиллированной водой опустили спичку без головки длиной 4 см. С помощью пипетки вблизи спички ввели мыльный раствор. Спичка стала удаляться. Рассчитайте силу поверхностного натяжения, дей-

ствующую на спичку со стороны мыльного раствора.

3. На рисунке (рис. 22) изображен график зависимости механического напряжения  $\sigma$  образца от относительного удлинения  $\epsilon$ . Определите модуль упругости (модуль Юнга) для данного материала. Из какого вещества изготовлен образец?

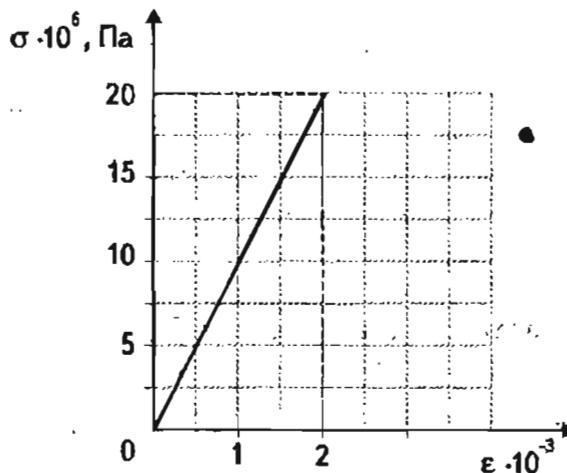


Рис. 22

*Для тех,  
кому стало интересно*

**Газ — основное состояние вещества во Вселенной**

Почти все наблюдаемое вещество во Вселенной (98–99%) находится в газообразном состоянии, в твердом и жидком — не более 1–2%. Практически весь газ сконцентрирован в звездах. Звезды — самосветящиеся газовые шары, источником энергии которых являются процессы взаимодействия между ядрами отдельных атомов. Пространство между звездами заполнено разреженным газом. Если у поверхности Земли в 1 см<sup>3</sup> содержится 3·10<sup>19</sup> молекул воздуха, то в межзвездном газе на два кубических сантиметра приходится в среднем только один атом газа.

Межзвездная среда имеет клочковатую структуру и образует облака газа. Открыты облака нейтрального водорода, имеющие низкую температуру ( $t = -200$  °С) и невысокую плотность (несколько десятков атомов в 1 см<sup>3</sup>). Это глубокий вакуум,

в миллиард раз более разреженный, чем создаваемый в кинескопе телевизора. Размеры облаков водорода — от  $3 \cdot 10^{14}$  км до  $3 \cdot 10^{15}$  км (для сравнения: звезды в среднем находятся друг от друга на расстоянии  $3 \cdot 10^{13}$  км). Обнаружены еще более холодные и плотные облака молекулярного водорода, совершенно непрозрачные для видимого излучения. В молекулярных облаках обнаружили, помимо обычных для межзвездного газа одиночных атомов водорода (77,4%), гелий (20,8%), углерод (0,4%), азот (0,09%), кислород (0,9%), натрий (0,004%), кремний (0,08%), железо (0,14%), а также большое количество сложных молекул. В молекулярных облаках присутствуют простейшие органические соединения. Молекулы в космическом пространстве образуются в ходе химических реакций.

### Значение влажности воздуха для живых организмов

При температуре 20–25 °С наиболее благоприятным для жизни человека считается воздух с относительной влажностью от 40% до 60%. Когда окружающая среда имеет температуру более высокую, чем температура тела человека, то происходит усиленное потоотделение. Обильное выделение пота ведет к охлаждению организма. Однако такое потоотделение является значительной нагрузкой для человека.

Относительная влажность ниже 40% при нормальной температуре воздуха также вредна, так как приводит к усиленной потере влаги организмом, что ведет к его обезвоживанию. Особенно низкая влажность воздуха в помещениях в зимнее время; она составляет 10–20%. При низкой влажности воздуха происходит быстрое испарение влаги с поверхности и высыхание слизистой оболочки носа, гортани, легких, что может привести к ухудшению самочувствия. Также при низкой влажности воздуха во внешней среде дольше сохраняются патогенные микроорганизмы, а на поверхности предметов скапливается больше статического заряда. Поэтому в зимнее время в жилых помещениях производят увлажнение с помощью пористых увлажнителей. Хорошими увлажнителями являются растения.

Если относительная влажность высока, то мы говорим, что воздух влажный и душный. Высокая влажность воздуха действует угнетающее, по-

скольку испарение происходит очень медленно. Концентрация паров воды в воздухе в этом случае высока, вследствие чего молекулы из воздуха возвращаются в жидкость почти так же быстро, как и испаряются. Если пот с тела испаряется медленно, то тело охлаждается очень слабо и мы чувствуем себя не совсем комфортно. При относительной влажности 100% испарение вообще не может происходить — при таких условиях мокрая одежда или влажная кожа никогда не высохнут.

Из курса биологии вы знаете о разнообразных приспособлениях растений в засушливых местностях. Но растения приспособлены и к высокой влажности воздуха. Так, родина *монстеры* — влажный экваториальный лес. Монстера при относительной влажности, близкой к 100%, «плачет», она удаляет избытки влаги через отверстия в листьях — *гидатоды*.

В современных зданиях производится кондиционирование воздуха — создание и поддержание в закрытых помещениях воздушной среды, наиболее благоприятной для самочувствия людей. При этом автоматически регулируется температура, влажность, состав воздуха.

### Композиты

Созданы композиционные материалы, механические свойства которых превосходят естественные материалы. Композиционные материалы (*композиты*) состоят из матрицы и наполнителей. В качестве матрицы применяются полимерные, металлические, углеродные или керамические материалы. Наполнители могут состоять из нитевидных кристаллов, волокон или проволоки. В частности, к композиционным материалам относят железобетон и железографит. *Железобетон* — один из основных видов строительных материалов. Он представляет собой сочетание бетона и стальной арматуры. *Железографит* — металлокерамический материал, состоящий из железа (95–98%) и графита (2–5%). Из него изготавливают подшипники, втулки для разных узлов машин и механизмов.

*Стеклопластик* — также композиционный материал, представляющий собой смесь стеклянных волокон и отвердевшей смолы.

Кости человека и животных представляют собой композиционный материал, состоящий из двух совершенно различных компонентов: коллагена и

минерального вещества. *Коллаген* — один из главных компонентов соединительной ткани (из него в основном состоят наши сухожилия). Большая часть минерального компонента кости — соли кальция. Атомы кальция составляют 22% общего количества атомов кости. В остальных тканях тела (мышцах, мозге, крови и т. д.) количество атомов кальция близко к 12–13%. Если кость подержать достаточно долго в 5%-ном растворе уксусной кислоты, то весь минеральный компонент в ней растворится. Оставшаяся часть, состоящая, в основном, из коллагена, станет эластичной, как резиновый жгут, и ее можно свернуть в кольцо.

**Прочны ли наши кости?**

Чтобы ответить на этот вопрос, сравните механические характеристики различных материалов и кости. Какие выводы вы можете сделать из анализа следующей таблицы?

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛОВ			
Материал	Прочность на сжатие 10 <sup>8</sup> Па	Прочность на растяжение 10 <sup>8</sup> Па	Модуль упругости 10 <sup>8</sup> Па
Бетон	21,0	2,1	165,0
Гранит	145,0	4,8	517,0
Дуб	59,0	117,0	110,0
Кость	170,0	120,0	179,0
Фарфор	552,0	55,0	—

**Выгодно ли делать детали полыми?**

При деформации твердых тел в средней части образца существует слой, не подвергающийся ни растяжению, ни сжатию. Рассмотрим это на примере балки, опирающейся на опоры (рис. 23). Балка изгибается так, что ее верхние слои сжимаются, а нижние растягиваются. При этом в средней части существует слой (а точнее, поверхность), длина которого не изменяется при изгибе. Этот слой называется *нейтральным* (он показан на рис. 23 пунктирными линиями). Материал, находящийся в этом слое, не деформируется, а лишь утяжеляет балку. Поэтому часть материала около нейтраль-

ного слоя можно удалить без заметного ущерба для прочности балки. Этот факт учитывают при изготовлении деталей машин и конструкций, работающих на изгиб. Их выгоднее делать полыми. Замена сплошных стержней и брусков трубами или двутавровыми балками, у которых частично удален средний (нейтральный) слой, дает экономию материала и значительно снижает массу конструкций без ухудшения их механических свойств.

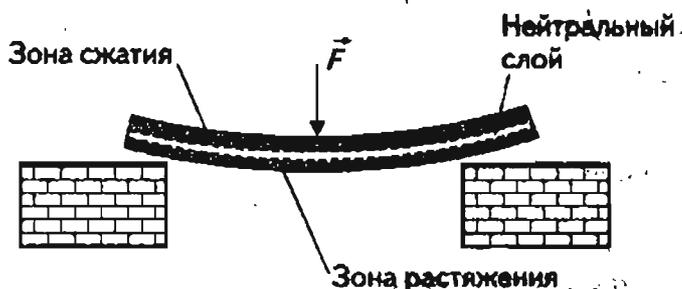


Рис. 23. Схема деформации балки

В процессе длительной эволюции живых организмов кости человека, животных и птиц приобрели трубчатое строение при сохранении общей прочности скелета. Наиболее ярко это выражено у птиц. Например, у птицы фрегата, имеющей размах крыльев около 2 м, масса скелета всего около 110 г. Однако и у бескрылых животных кости тоже полые. Измерения показывают, что для самой крупной трубчатой кости скелета, бедренной, отношение внутреннего диаметра поперечного сечения к внешнему диаметру у лисицы, человека, льва и жирафа составляет примерно 0,5–0,6. Это дает возможность всем животным приблизительно на 25% уменьшить массу скелета при сохранении той же прочности. Стебли некоторых растений также имеют трубчатое строение.

**Твердость.**

**Минералогическая шкала твердости**

Твердость — сопротивление материала вдавливанию или царапанию. Она определяется различными методами. Твердость — свойство, зависящее от состава и структуры материала, его термической обработки, температуры.

Для оценки твердости минералов часто применяется десятибалльная шкала твердости, предложенная в 1811 г. немецким минералогом Ф. Моосом. Эта шкала представляет собой последовательность десяти минералов, расположенных в порядке возра-

стания их твердости. Твердость каждого из этих минералов условно принята за стандартную (эталонную) величину. Ниже приведена минералогическая шкала твердости.

Определение твердости основано на том, что испытуемый образец царапают последовательно минералами-эталоном и определяют, какой из них первым оставляет на поверхности образца царапину. Таким образом всегда можно установить, что образец по твердости или соответствует одному из эталонов, или лежит в промежутке между двумя соседними эталонами.

МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ШКАЛА ТВЕРДОСТИ			
Название минерала	Твердость, усл. единицы	Название минерала	Твердость, усл. единицы
Тальк	1	Полевой шпат (ортоклаз)	6
Гипс (или каменная соль)	2	Кварц	7
Известковый шпат	3	Топаз	8
Плавленый шпат	4	Корунд	9
Апатит	5	Алмаз	10

### Творческое задание

Возьмите в кабинете физики стеклорез и пластинки (или стержни) из алюминия, железа, меди, олова, свинца, слюды, стекла, графитовый стержень.

1. Поочередно проведите краем пластинки (или стержня) по поверхности другого материала. Запишите, какой глубины царапины оставлены каждым из материалов. Что можно сказать о твердости каждого из материалов?
2. Проведите стеклорезом по поверхности каждой из пластинок. Что вы наблюдаете?
3. Сопоставьте результаты своего эксперимента с данными таблицы, приведенной ниже.

### ТВЕРДОСТЬ НЕКОТОРЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И МИНЕРАЛОВ

Элемент или минерал	Твердость, усл. единицы	Элемент или минерал	Твердость, усл. единицы
Алюминий	2,8	Олово	1,5
Графит	0,5	Свинец	1,5
Железо	4	Слюда	2-3
Медь	3	Стекло	?

### Жидкие кристаллы

В 1889 г. австрийским ботаником Ф. Рейницером и немецким физиком О. Леманом были открыты органические вещества, которые обладают свойствами жидкости — текучестью, но сохраняют определенную упорядоченность в расположении молекул и анизотропию свойств, характерную для монокристаллов. Эти вещества получили название *жидких кристаллов*.

Как же могут существовать жидкие кристаллы, совмещающие в себе прямо противоположные свойства жидкости и кристалла? Дело в том, что жидкость, оставаясь в целом изотропной, может состоять из анизотропных молекул. Молекулы, из которых состоит жидкость, имеют удлиненную форму в виде палочек (рис. 24). Каждая отдельная молекула в этом случае — анизотропна. Например, она может пропускать свет, который распространяется вдоль палочки, и поглощать его, если он распространяется поперек этого направления. Но в жидкости все молекулы-палочки расположены хаотически, и в среднем свет поглощается, проходя по разным направлениям одинаково.

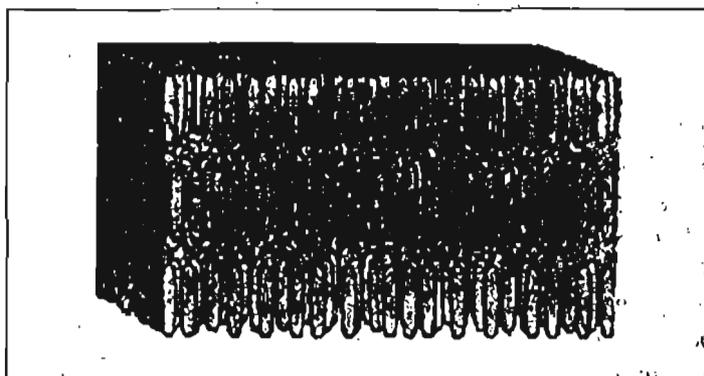


Рис. 24. Молекулы жидких кристаллов

Такую ситуацию можно представить, если высыпать коробок спичек в таз с водой и хорошо перемешать их. Тогда мы увидим, что поверхность воды со спичками будет изотропной, т. е. по любому направлению мы пересечем приблизительно одинаковое количество спичек, как вдоль, так и поперек их длины.

Представим теперь, что каждая спичка обладает магнитными свойствами, подобно магнитной стрелке. Поместим таз в сильное магнитное поле, направленное вдоль поверхности воды. Тогда все спички своими головками вытянутся в одну сторону, и поверхность приобретет анизотропные свойства — направления вдоль и поперек спичек будут обладать различными свойствами. Приобретя анизотропные свойства, жидкость сохранила свои основные свойства: воду со спичками можно перелить в другой таз, она принимает форму того сосуда, в который ее наливают, спички могут свободно двигаться.

Аналогичные процессы происходят и в некоторых жидкостях, состоящих из анизотропных молекул. Под действием внешних воздействий, в частности, электрического поля, тонкие слои такой жидкости приобретают анизотропные свойства, которые можно использовать в технике. Например, помещая такую жидкость в тонкий зазор толщиной в 0,1–0,01 мм между двумя стеклянными пластинками, на которых в одном направлении нацарапаны микроскопические бороздки, добиваются того, что все молекулы выстраиваются вдоль этих бороздок. Такая плоская сборная пластинка (ячейка) хорошо пропускает падающий на нее свет. Если при помощи прозрачных электродов создать на отдельных ее участках электрическое поле, то ориентация молекул в этих местах изменится и изменится способность пропускать свет.

Для переориентации молекул в тонком слое жидкого кристалла требуются очень малые затраты электрической энергии, и этот процесс происходит достаточно быстро — за сотые и даже тысячные доли секунды. При помощи слабых электрических сигналов можно управлять тем, как слой жидкого кристалла пропускает свет. Такой принцип реализован в буквенно-цифровых индикаторах (электронные часы, микрокалькуляторы, термометры), его используют для создания экранов телевизоров, плоских дисплеев компьютеров, информационных

стендов на железнодорожных вокзалах и в аэропортах.

Некоторые жидкие кристаллы меняют цвет при изменении температуры. Это свойство используют в медицине для определения участков тела с повышенной температурой и в технике для контроля качества микросхем.

Реальные процессы, которые происходят в жидкокристаллических ячейках, значительно сложнее и многообразнее, чем описанная выше модель. Поэтому в настоящее время жидкие кристаллы интенсивно исследуются учеными, а инженеры находят все более широкие и интересные возможности их применения в самых разнообразных устройствах.

Справочный  
раздел

Таблица 1. Поверхностное натяжение некоторых жидкостей на границе с воздухом

Жидкость	Температура $t, ^\circ\text{C}$	Поверхностное натяжение, $\sigma \cdot 10^{-3}, \text{Н/м}$
Ацетон	20	23,70
Белок куриного яйца	20	52,70
Бензол	20	28,90
Вода	0	75,70
Вода	20	72,80
Вода	30	71,15
Вода	50	67,90
Вода	100	58,84
Глицерин	20	63,40
Керосин	0	29,00
Керосин	20	24,00
Кровь	37	45,40
Мыльный раствор	20	40,00
Масло вазелиновое	20	31,80
Масло касторовое	20	36,40
Нефть	20	30,00
Раствор сахара 5%	20	74,00
Раствор сахара 10%	20	74,50
Раствор сахара 20%	20	76,50
Раствор сахара 63%	20	79,60
Ртуть	20	472,00
Спирт метиловый	20	22,60
Хлороформ	20	27,10
Эфир этиловый	20	17,00

Таблица 2. Психрометрическая таблица

Показания сухого термометра	Разность показаний сухого и влажного термометров, °С										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Относительная влажность, %										
0	100	81	63	45	28	11	—	—	—	—	—
2	100	84	68	51	35	20	—	—	—	—	—
4	100	85	70	56	42	28	14	—	—	—	—
6	100	86	73	60	47	35	23	10	—	—	—
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	—	—
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5	—
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	—
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

Таблица 3. Модуль упругости (модуль Юнга) различных материалов (при температуре  $t = 20$  °С)

Материал	$E \cdot 10^9$ , Па	Материал	$E \cdot 10^9$ , Па
Алюминий	70,0 – 71,0	Паутина	3,0
Бетон	14,6 – 23,2	Резина	0,9
Вольфрам	415,0	Свинец	16,0 – 17,0
Гранит	49,0	Сталь	200,0 – 220,0
Железо	190,0 – 210,0	Стекло	50,0 – 60,0
Капрон	1,4 – 2,0	Хлопок	12,0
Кирпичная кладка	2,7 – 3,0	Чугун серый, белый	115,0 – 160,0
Лед (при $t = -4$ °С)	10,0	Шелковая нить	13,0
Мрамор	56,0 – 73,0	Шерсть	6,0
Органическое стекло	2,9 – 4,1	Эбонит	3,1



# Тепловые явления

## Изучив эту тему,

- ♦ вы познакомитесь с тепловыми явлениями: нагреванием и охлаждением, испарением и конденсацией, кипением, плавлением и кристаллизацией;
- ♦ узнаете формулы расчета количества теплоты для различных тепловых явлений и при сгорании топлива;
- ♦ научитесь проводить эксперименты и анализировать их результаты; решать графические и расчетные задачи.

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

Беспорядочное движение большой совокупности частиц (атомов, молекул и др.), из которых состоят тела, представляет собой **тепловое движение**.

Сумма энергии хаотического (теплого) движения всех частиц тела и энергии взаимодействия этих частиц называется **внутренней энергией**.

**Теплопроводность** — явление передачи энергии от более нагретых участков тела к менее нагретым в результате теплового движения и взаимодействия частиц, из которых состоит тело.

## Основные понятия:

- ♦ Тепловое движение ♦ Внутренняя энергия ♦ Теплопроводность ♦ Конвекция ♦ Лучистый теплообмен
- ♦ Количество теплоты ♦ Испарение ♦ Конденсация
- ♦ Кипение ♦ Плавление ♦ Кристаллизация

**Конвекция** (от латинского слова *convectio* — *принесение, доставка*) — процесс теплообмена, осуществляемый путем переноса энергии потоками жидкости или газа.

Перенос энергии от одного тела к другому, обусловленный процессами испускания, распространения, рассеяния и поглощения электромагнитного излучения, называется **лучистым теплообменом**.

Процесс изменения внутренней энергии без совершения работы над телом или самим телом называется **теплообменом**.



При теплообмене энергия всегда передается от более нагретого тела к менее нагретому. Обратный процесс самопроизвольно (сам по себе) никогда не происходит, то есть *теплообмен необратим*.

Энергия, переданная системе или полученная системой при теплообмене, называется количеством теплоты.

Количество теплоты обозначается буквой латинского алфавита  $Q$  (читается «ку»). Наименование единицы в СИ: Дж (джоуль). Условились считать: если система (тело) получает тепло, то  $Q > 0$ ; если система (тело) отдает тепло, то  $Q < 0$ .

К тепловым явлениям относятся:

- нагревание и охлаждение;
- испарение и конденсация;
- кипение;
- плавление и кристаллизация.

Процесс, посредством которого молекулы жидкости высвобождаются из жидкости и превращаются в молекулы газа, называется **испарением** или **парообразованием**.

Процесс превращения пара в жидкость называется **конденсацией** (от латинского слова *condensatio*, означающего *уплотнение, сгущение*).

Процесс	Формула расчета
Нагревание или охлаждение тела	$Q = cm\Delta t,$ где $c$ – удельная теплоемкость вещества; $\Delta t$ – разность температур $[c] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$
Кипение или конденсация	$Q = Lm,$ где $L$ – удельная теплота парообразования $[L] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Плавление или отвердевание (кристаллизация)	$Q = \lambda m,$ где $\lambda$ – удельная теплота плавления вещества ( $\lambda$ – буква греческого алфавита, читается «лямбда») $[\lambda] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Сгорание топлива	$Q = qm,$ где $q$ – удельная теплота сгорания топлива; $m$ – масса топлива $[q] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$

**Кипение** – это испарение, происходящее как с поверхности жидкости, так и внутри самой жидкости.

Температура, при которой жидкость кипит, называется **температурой кипения**. Во время кипения температура жидкости не изменяется.

**Плавление** – переход вещества из твердого состояния в жидкое.

**Отвердевание** – переход вещества из жидкого состояния в твердое.

Температура, при которой вещество плавится, называется **температурой плавления вещества**.

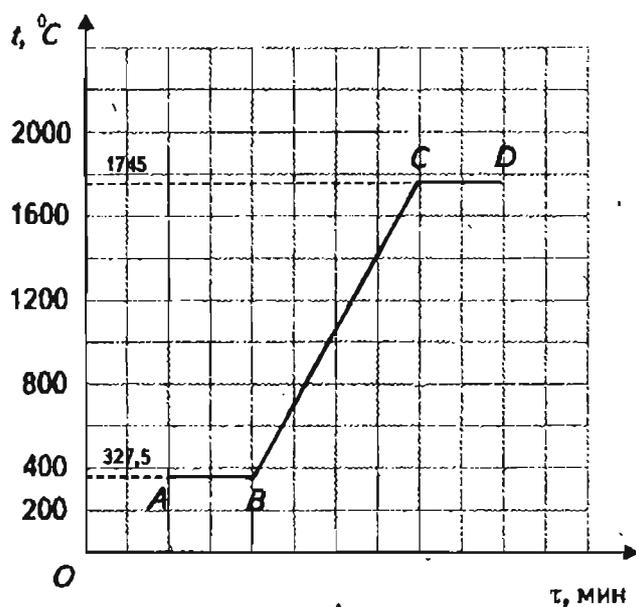
Температура, при которой вещество отвердевает (кристаллизуется), называется **температурой отвердевания** (или кристаллизации).

*Вещества отвердевают (кристаллизуются) при той же температуре, при которой они плавятся.*

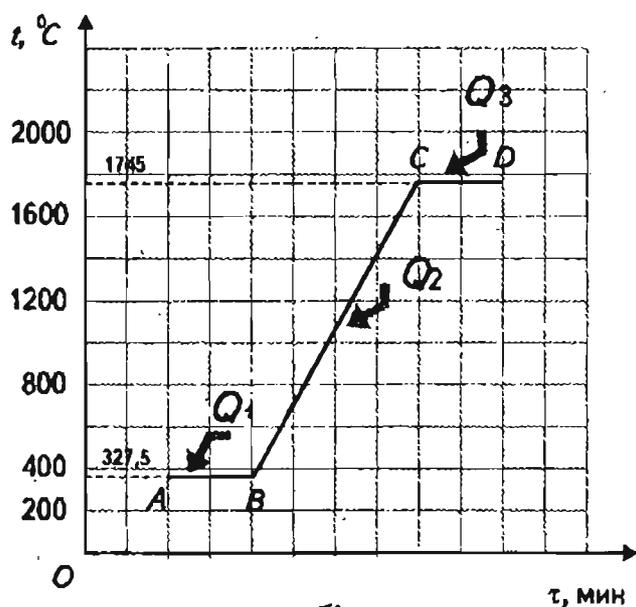
*Практикум по  
решению задач*

На графике зависимости температуры от времени (рис. 25 а) показано изменение состояния вещества.

- Используя график, определите состояние вещества на участках  $AB$ ,  $BC$  и  $CD$ . Какое это вещество?
- Рассчитайте общее количество теплоты, полученное 3 кг данного вещества.



а)



б)

Рис. 25. Изменение состояния вещества

Анализ графика зависимости температуры от времени  $t=t(\tau)$

Линия графика  $ABCD$  направлена вверх, следовательно вещество нагревается. На участке  $AB$  температура постоянна, она соответствует температуре плавления свинца (см. табл. 4 справочного раздела). На участке  $AB$  свинец переходит из твердого состояния в жидкое, получив некоторое количество теплоты  $Q_1$  (рис. 25 б). На участке  $BC$  жидкий свинец нагревается до температуры парообразования  $1745^\circ\text{C}$  (см. табл. 9), получив количество теплоты  $Q_2$ . На участке  $CD$  свинец переходит из жидкого состояния в газообразное, получив количество теплоты  $Q_3$ .

Используя таблицы 6, 9 и 10, определяем удельную теплоемкость, удельную теплоту парообразования и удельную теплоту плавления свинца.

Расчет количества теплоты, полученного свинцом

Дано:

$$m = 3 \text{ кг}$$

$$\lambda = 24,3 \cdot 10^3 \text{ Дж}$$

$$c = 0,1 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$t_1 = 327,5^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 1745^\circ\text{C}$$

$$L = 860 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$Q = ?$$

Решение:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (1)$$

$$Q_1 = \lambda m \quad (2)$$

$$Q_2 = cm\Delta t \quad (3)$$

$$Q_3 = Lm \quad (4)$$

Подставляя уравнения (2), (3) и (4) в выражение (1), получаем расчетную формулу:

$$Q = \lambda m + cm\Delta t + Lm.$$

Проверим единицу измерения:

$$[Q] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{кг} + \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot \text{кг} \cdot ^\circ\text{C} + \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{кг} = \text{Дж}.$$

Производим расчет:

$$Q = 24,3 \cdot 10^3 \cdot 3 + 0,1 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot (1745 - 327,5) + 860 \cdot 10^3 \cdot 3 = (72,9 + 425,25 + 2580) \cdot 10^3 \approx 3,1 \cdot 10^6 \text{ Дж} \approx 3,1 \text{ МДж}.$$

Ответ: при плавлении, нагревании и парообразовании свинец получает примерно 3,1 МДж теплоты.

*Лабораторные  
работы*

### 1. Зависимость испарения жидкости от различных факторов

**Цель работы:** исследовать зависимость испарения жидкости от различных факторов.

**Приборы и материалы:** два предметных стекла; стеклянная палочка; пробирки с жидкостью (водой, спиртом, одеколоном, валериановыми каплями и др.); две пипетки; спиртовка (или свеча); бумажный веер; спички.

1. Капните каплю воды из пипетки на предметное стекло и разотрите ее стеклянной палочкой по поверхности. То же сделайте с каплей спирта (одеколону, валериановых капель и др.) на втором стекле. Наблюдайте за испарением жидкостей. Какая из них быстрее испарится?
2. Нанесите на предметные стекла по мазку одной и той же жидкости (например, одеколону). Одно стекло отложите в сторону, а возле второго помажьте бумажным веером. Какой мазок высохнет быстрее?
3. Нанесите на предметные стекла по мазку одной и той же жидкости. Осторожно прогрейте пламенем спиртовки (свечи) снизу одно из стекол. Какое пятно быстрее высохнет?
4. Накапайте на два предметных стекла по одинаковому количеству капель одной и той же жидкости. Возьмите одно из стекол и, наклоняя его, заставьте жидкость растечься. Положите это предметное стекло рядом с первым. Оставьте их на время, в течение которого жидкость полностью высохнет. На каком предметном стекле испарение произошло быстрее?
5. На основе опытов перечислите факторы, от которых зависит скорость испарения жидкости. Запишите их в тетрадь.

### 2. Плавление кристаллических тел

**Цель работы:** определить температуру плавления льда.

**Приборы и материалы:** стакан (пробирка), наполненная льдом, термометр, спиртовка (или другой нагреватель), спички, штатив, часы.

1. Расположите приборы, как показано на рис. 26.

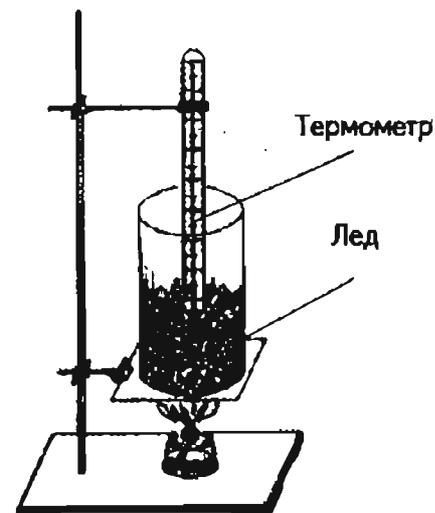


Рис. 26. Плавление льда

2. Зажгите спиртовку и начните наблюдать за изменением температуры льда с течением времени.
3. Обратите внимание на температуру, при которой начинается процесс плавления льда.
4. После того как весь лед расплавится, наблюдайте за изменением температуры еще 5 мин.
5. Погасите спиртовку. Наблюдайте за изменением температуры воды.
6. Результаты наблюдений занесите в таблицу.

Время, мин	Температура, °C

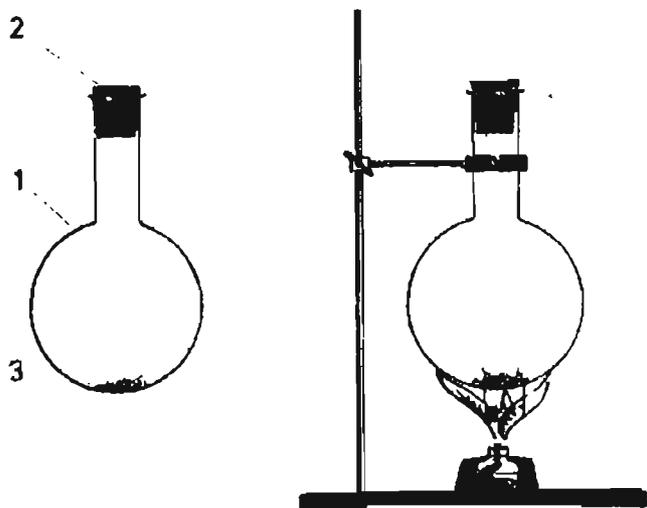
7. По данным таблицы постройте график изменения температуры со временем (по оси абсцисс отложите время, по оси ординат — температуру).
  8. Определите по графику:
    - а) при какой температуре плавится лед;
    - б) как долго длится плавление льда;
    - в) до какой температуры было нагрето вещество в жидком состоянии.
- Результаты анализа графика запишите в тетрадь.
9. Ответьте на следующие вопросы.
    - а) Какой цвет имел лед до начала плавления, во время плавления, после плавления?
    - б) Какова химическая формула льда?

*Экспериментальные  
задания*

### 1. Наблюдение изменения температуры при испарении жидкости

Шарики двух термометров обмотайте ватой. Запишите показания термометров. Затем на вату одного из термометров капните из пипетки спиртом (водой или эфиром). Что вы наблюдаете? Запишите показания термометров. Какой вывод можно сделать? Как объяснить наблюдаемое явление?

### 2. Наблюдение испарения йода



1 — стеклянная колба; 2 — резиновая пробка;  
3 — кристаллики йода;

Рис. 27. Приборы и материалы к заданию 2

В круглодонной колбе находятся кристаллы йода. Сверху колба плотно закрыта резиновой пробкой (рис. 27).

1. Выскажите и запишите гипотезу о том, что произойдет с кристалликами йода при нагревании колбы в пламени спиртовки.
2. Слегка нагрейте дно колбы в пламени спиртовки. Что вы наблюдаете?
3. Охладите колбу. Что вы наблюдаете при охлаждении колбы? Результаты наблюдений запишите в тетрадь.
4. Подтвердилась ли ваша гипотеза?

### 3. Наблюдение кипения эфира

В пробирку налит этиловый эфир при комнатной температуре. Что произойдет с эфиром при опус-

кании пробирки в стакан с горячей водой ( $t=90^{\circ}\text{C}$ )? Для ответа используйте табличные данные. Проверьте свои предположения на опыте (рис. 28).

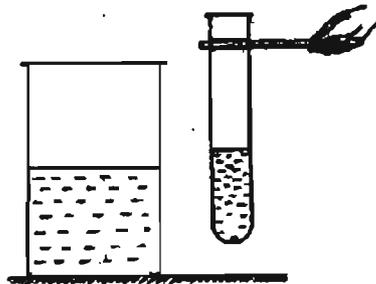
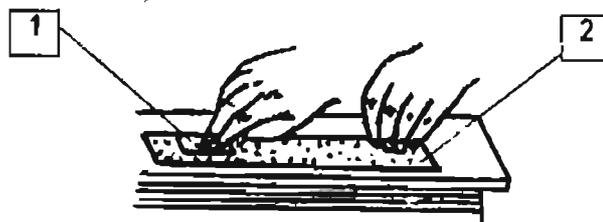


Рис. 28. Приборы и материалы к заданию 3

### 4. Наблюдение изменения внутренней энергии тел при совершении работы

На рис. 29 изображены алюминиевая фольга (1) и картон (2).



1 — алюминиевая фольга; 2 — картон

Рис. 29. Материалы к заданию 4

1. Прижмите фольгу к картону и потрите ею о картон, сделав несколько движений вперед-назад (например, 15 движений). Обратите внимание на то, что произошло с фольгой.
2. Потрите фольгу о картон, сделав 30 движений. Что изменилось при этом?
3. Результаты эксперимента запишите в тетрадь.

### 5. Сравнение теплопроводности различных веществ

1. К штативам подвесьте медный и стеклянный стержни одинаковых размеров так, как показано на рис. 30 а. К стержням снизу прикрепите пластилином гвоздики (рис. 30 б). Нагрейте обращенные друг к другу концы стержней, как показано на рис. 30 в. Что вы наблюдаете? Что вы можете сказать о теплопроводности стекла и меди?

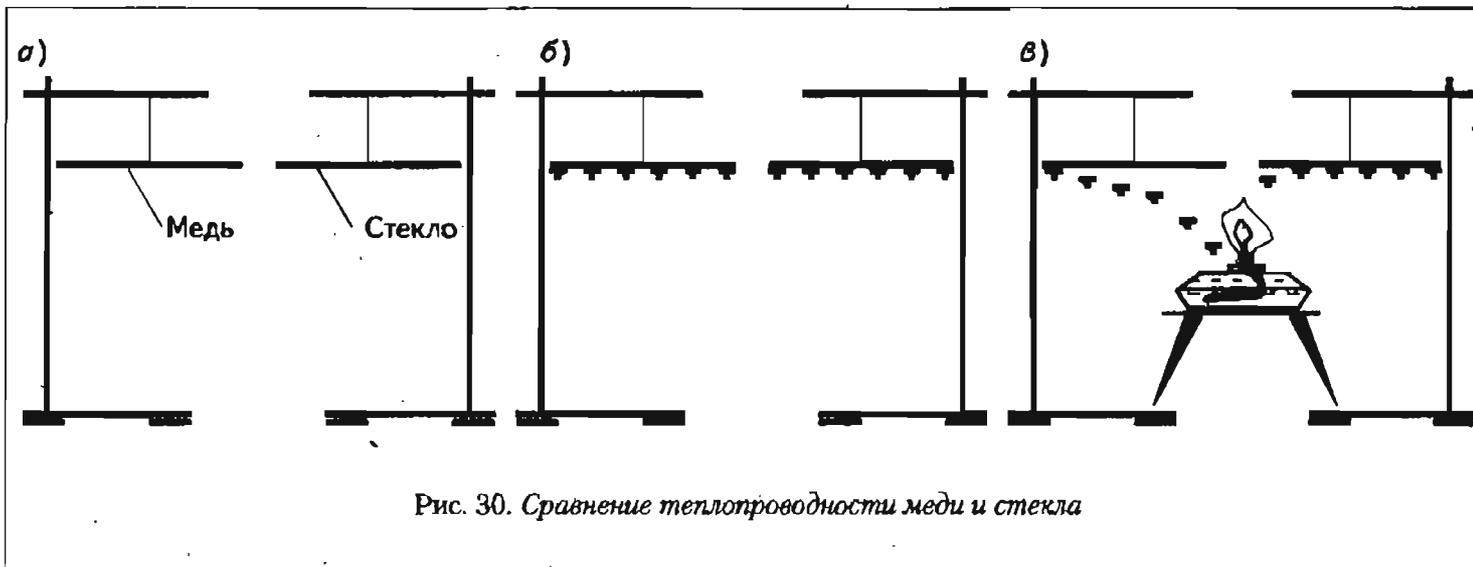


Рис. 30. Сравнение теплопроводности меди и стекла

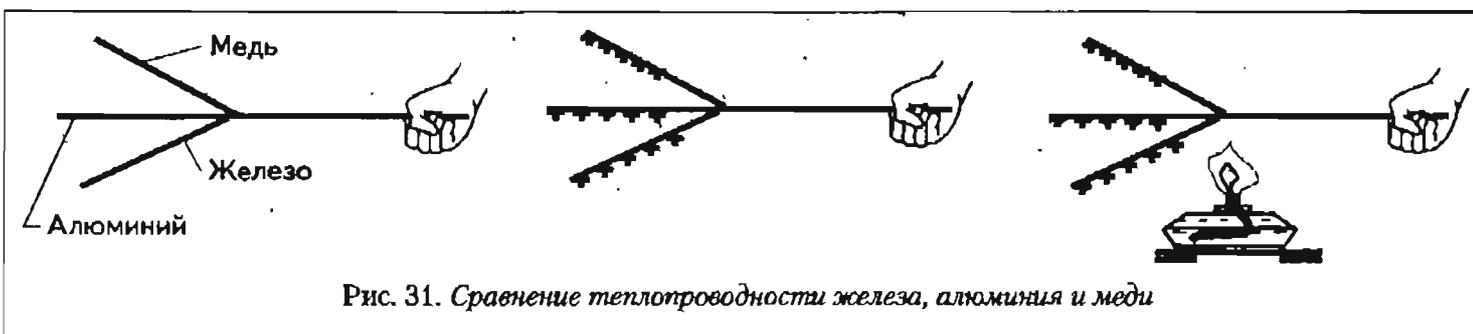


Рис. 31. Сравнение теплопроводности железа, алюминия и меди

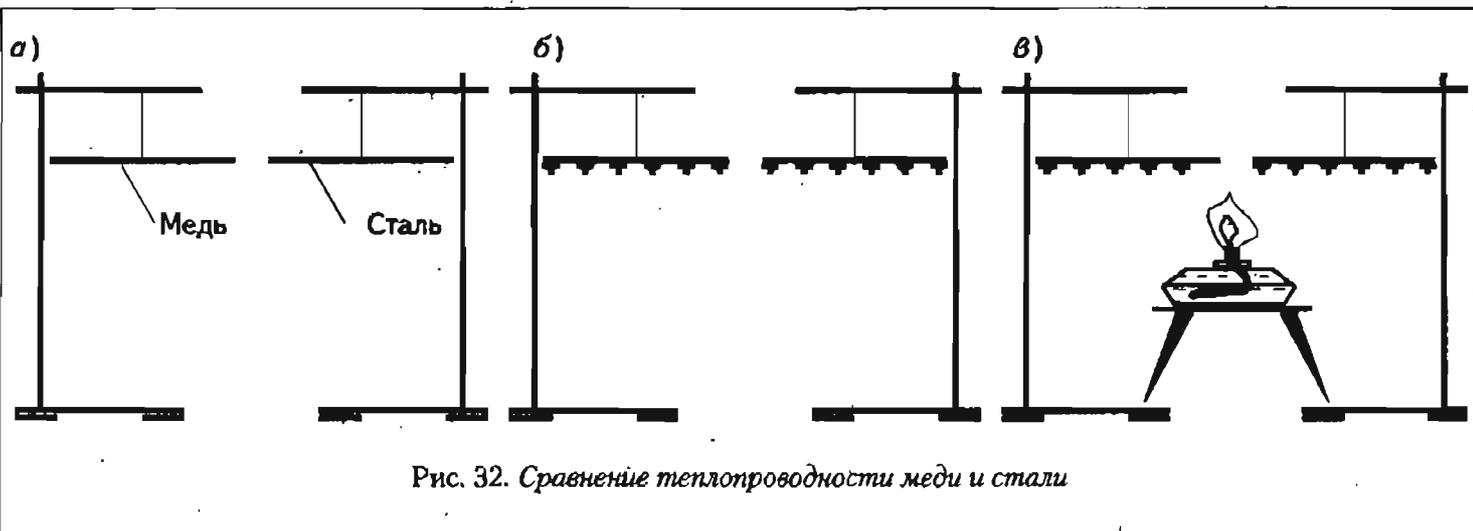


Рис. 32. Сравнение теплопроводности меди и стали

2. Железная, алюминиевая и медная проволоки одинаковых размеров свиты в общий жгут так, как показано на рис. 31 а. К стержням снизу прикрепите пластином гвоздики (рис. 31 б). Нагрейте, обращенные друг к другу, концы стержней. Что вы наблюдаете? Что вы можете сказать о теплопроводности железа, алюминия и меди?

3. К штативам подвесьте медный и стальной стержни одинаковых размеров (рис. 32 а). К стержням снизу прикрепите пластином гвоздики (рис. 32 б). Нагрейте обращенные друг к другу концы стержней (рис. 32 в). Что вы можете сказать о теплопроводности меди и стали?

4. Результаты эксперимента запишите в тетрадь.

## 6. Наблюдение теплообмена в воде конвекцией

1. Налейте в пробирку холодной воды до половины и аккуратно с помощью стеклянной палочки опустите в воду кристаллики перманганата калия («марганцовки»). Расположите пробирку над пламенем спиртовки так, как показано на рис. 33. Проследите за движением нагретой воды. Когда окрашенный поток достигнет поверхности воды, погасите спиртовку.

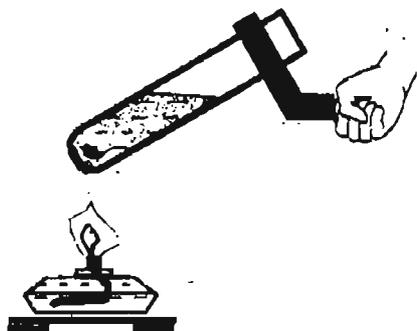


Рис. 33. Теплообмен в воде конвекцией

2. Результаты наблюдений запишите в тетрадь. Сделайте схематический рисунок, указав направления потоков горячей и холодной воды.

## 7. Наблюдение теплообмена в воздухе конвекцией

1. Вертушку из алюминиевой фольги расположите так, как показано на рис. 34. Что вы наблюдаете, когда вертушка находится над пламенем? Изменяется ли скорость вращения вертушки, если перемещать ее по вертикали над пламенем? Если изменяется, то как: увеличивается или уменьшается?

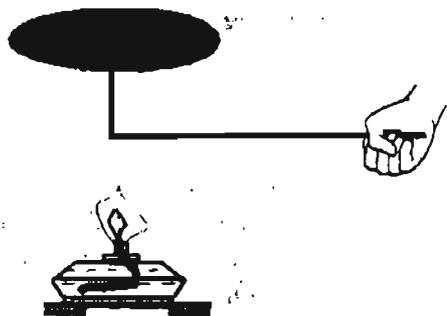


Рис. 34. Теплообмен в воздухе конвекцией

2. Результаты наблюдений запишите в тетрадь.

## Самостоятельная работа

### Самостоятельная работа 1.1

(выполняется в классе, рассчитана на 15 минут)

1. Кусок свинца можно нагреть разными способами: ударяя по нему молотком, помещая в пламя горелки или в горячую воду. Можно ли утверждать, что во всех случаях кусок свинца получил определенное количество теплоты? Увеличилась ли внутренняя энергия свинца?
2. В медицинской практике часто используются согревающие компрессы, грелки, а также массаж. Какие способы изменения внутренней энергии при этом используются?
3. Объясните причину:
  - 1) нагревания ножа при заточке;
  - 2) подтаивания льда под коньками при движении конькобежца;
  - 3) таяния льда (снега) на ладони.
4. Используя схему, представленную на рис. 35, укажите направление теплообмена горячей воды с воздухом и подставкой. Ответ обоснуйте.

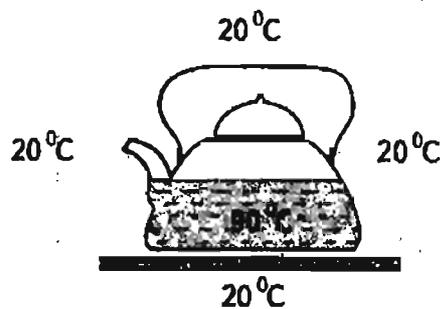


Рис. 35

5. Обоснуйте ответы на вопросы.
  - 1) Два человека живут в разных природных зонах: один на Крайнем Севере, другой — в пустыне. Оба тепло одеваются. Почему?
  - 2) Почему птицы в холодную погоду сидят нахохлившись?
  - 3) Почему белки или лисицы спят, закрывшись хвостом?
  - 4) Какое значение имеют двойные (на Крайнем Севере — тройные) оконные рамы?

- 5) Почему на зиму стволы деревьев покрывают древесными опилками?
- 6) Почему зимой мы надеваем шерстяные носки?
- 7) Почему в солнечную погоду снег в городе тает быстрее, чем за городом?
- 8) Почему летом мы предпочитаем светлую, а не темную одежду?
- 9) Почему самолеты, аэростаты окрашивают светлой краской?
- 10) Каково назначение полиэтиленовых пленок на парниках?
- 11) Когда нам жарко, то мы машем веером. Зачем мы это делаем?

### Самостоятельная работа 1.2

(выполняется дома, рассчитана на 15 минут)

1. Объясните процесс испарения жидкости на основе атомно-молекулярного учения о строении вещества. Объяснение сопроводите рисунком.
2. Объясните процесс конденсации жидкостей на основе атомно-молекулярного учения о строении вещества. Объяснение сопроводите рисунком.
3. Ответьте на вопросы:
  - 1) Почему мокрое полотенце на солнце сохнет быстрее, чем в тени?

- 2) Почему, выходя из водоема (реки, озера и др.), даже в жаркий день вы ощущаете прохладу?
- 3) Почему образуется «дымка» над поверхностью чашки с горячим чаем?
- 4) С какой целью свежесрезанную зелень оборачивают сырой тканью?
- 5) Почему в холод многие животные (например кошки, собаки) сворачиваются в клубок, а в жару, наоборот, стремятся увеличить свою свободную поверхность?

- 6) Для чего нарезают на части картофель, яблоки и другие овощи и фрукты, предназначенные для сушки?
- 7) Когда целесообразнее срезать листья салата: рано утром или же вечером после жаркого дня?

### Самостоятельная работа 2.1

(выполняется в классе, рассчитана на 40 минут)

1. Деталь из титана массой 1,5 кг нагрели до 50 °С, а затем поставили на подставку. Температура в помещении 20 °С. Какое количество теплоты передала деталь окружающей среде и подставке?
2. Стальному бруску массой 200 г сообщили 6 кДж теплоты. При этом он нагрелся до 80 °С. Какая была начальная температура бруска?
3. Стальной шарик нагрели и опустили в воду, находящуюся в мензурке так, как показано на рис. 36. Рассчитайте количество теплоты, отданное воде. Нагреванием мензурки пренебрегите.  
Плотность стали примите равной  $7600 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .
4. Утром в саду собрали 2 кг абрикосов и решили сохранить до вечера. Для этого положили их в стеклянную банку и поставили в холодильник, где температура 4 °С. Вечером вынули абрикосы из холодильника и поставили на кухонный стол. Температура на кухне 25 °С. Масса банки 300 г.

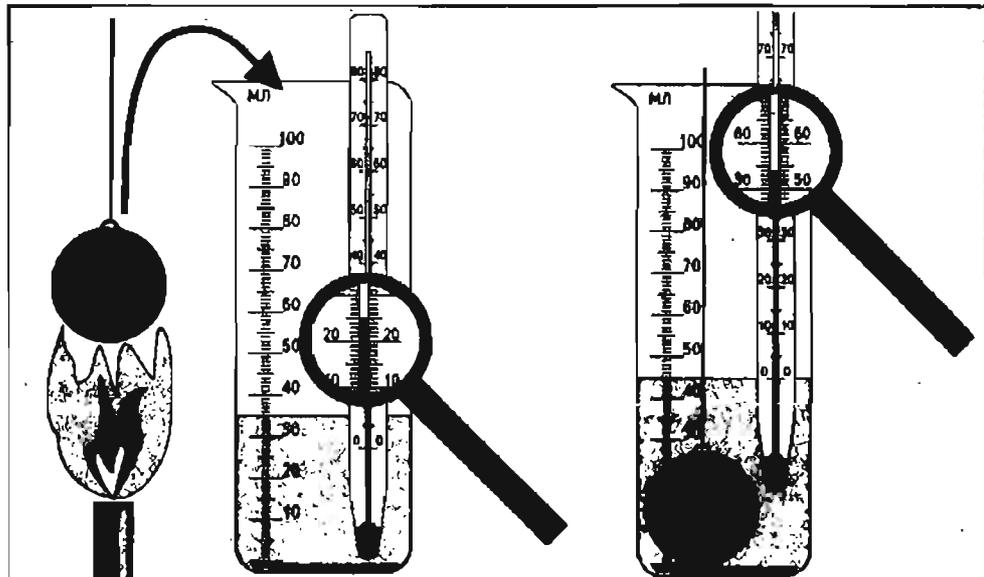


Рис. 36

Какое количество теплоты потребуется для нагревания абрикосов и стеклянной банки до комнатной температуры? Необходимые данные для расчетов найти в таблицах справочного раздела.

5. В бассейне вместимостью  $1200 \text{ м}^3$  температура морской воды  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Какое количество теплоты необходимо сообщить воде, чтобы ее температура стала равной  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ? Плотность морской воды примите равной  $1010 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

6. (Уровень В). Какое количество теплоты отдаст окружающей среде асфальтовое покрытие дороги площадью  $100 \text{ м}^2$  при понижении температуры на  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Толщина покрытия  $10 \text{ см}$ .

Плотность асфальта примите равной  $1500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

### Самостоятельная работа 2.2

(выполняется дома, рассчитана на 20 минут)

1. Железный, медный и алюминиевый шарики одинаковой массы нагрели в кипящей воде, а затем вынули и положили на парафиновую пластинку. Под каким из шариков расплавится больше парафина? Ответ обоснуйте.

2. Латунный цилиндр массой  $150 \text{ г}$  нагрели в кипящей воде и опустили в сосуд с водой. Вода в сосуде нагрелась до  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Какое количество теплоты отдал цилиндр воде при охлаждении? Нагреванием воздуха и сосуда пренебрегите.

3. Из морозильника вынули  $0,5 \text{ кг}$  вишни и поставили на стол. В морозильнике температура  $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ . Какое количество теплоты потребуется для нагревания вишни до комнатной температуры  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ? Необходимые дополнительные данные найдите в таблицах справочного раздела.

### Самостоятельная работа 3.1

(выполняется в классе, рассчитана на 40 минут)

1. Одинаковое ли количество теплоты потребуется для парообразования  $2 \text{ кг}$  серебра и алюминия? Ответ обоснуйте.

2. Азоту, находящему в твердом состоянии, сообщили  $7770 \text{ Дж}$  теплоты. Какая масса азота при этом расплавится?

3. (Уровень В). В процессе парообразования водороду было передано  $122,58 \text{ кДж}$  теплоты. Ка-

кой объем паров водорода образуется при этом? Выразите объем паров водорода в  $\text{м}^3$  и л. Плот-

ность водорода примите равной  $0,09 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

4. На графике зависимости температуры от времени, представленном на рис. 37, показано изменение состояния вещества.

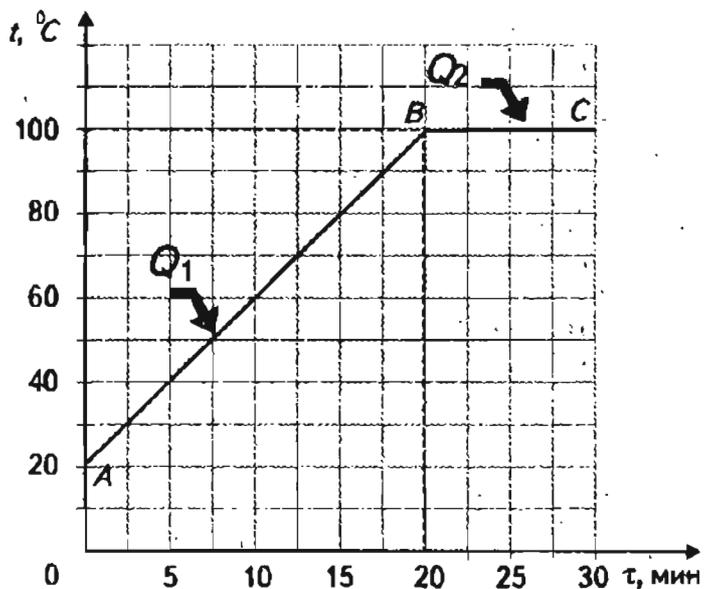


Рис. 37

1) Используя график, определите состояние вещества на участках AB и BC.

2) Используя табличные данные, определите какое это вещество?

3) Что означает направление стрелок  $Q_1$  и  $Q_2$ ?

4) Рассчитайте общее количество теплоты, полученное  $2 \text{ кг}$  данного вещества.

5. На рисунке представлен график зависимости температуры от времени (рис. 38).

1) Какой процесс изображен на графике и для какого вещества?

2) Какую температуру имело вещество в начальный момент наблюдения?

3) Через какое время следовали друг за другом отсчеты температуры?

4) Через сколько времени после начала наблюдения температура вещества достигла  $660,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ?

5) Сколько времени продолжался процесс перехода вещества из одного агрегатного состояния в другое?

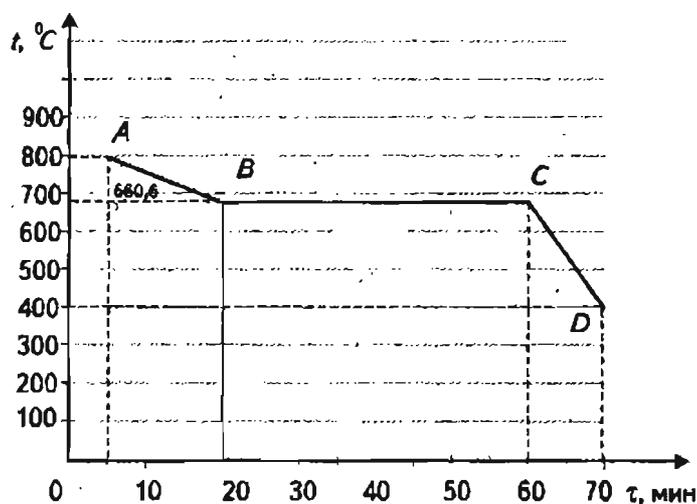


Рис. 38

- 6) В каком состоянии находилось вещество: на участке  $AB$ , на участке  $BC$  и на участке  $CD$ ?
6. На графике зависимости температуры от времени, представленном на рис. 39, показано изменение состояния вещества.

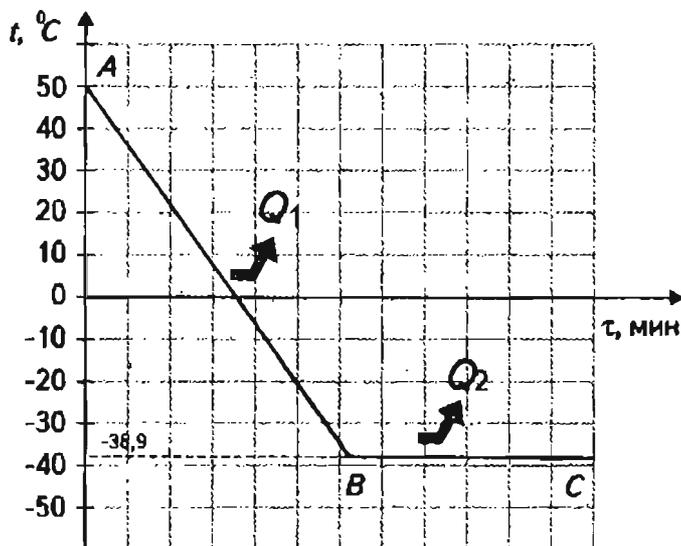


Рис. 39

- Используя график, определите состояние вещества на участках  $AB$  и  $BC$ .
- Используя табличные данные, определите какое это вещество?
- Что означает направление стрелок  $Q_1$  и  $Q_2$ ?
- Рассчитайте общее количество теплоты, отданное 3 кг данного вещества.

### Самостоятельная работа 3.2 (выполняется дома)

- Одинаковое ли количество теплоты выделится при плавлении цинкового и свинцового брусьев равной массы? Ответ обоснуйте.
- Какое количество теплоты выделится при кристаллизации 5 кг меди?
- На графике зависимости температуры от времени, представленном на рис. 40, показано изменение состояния вещества.

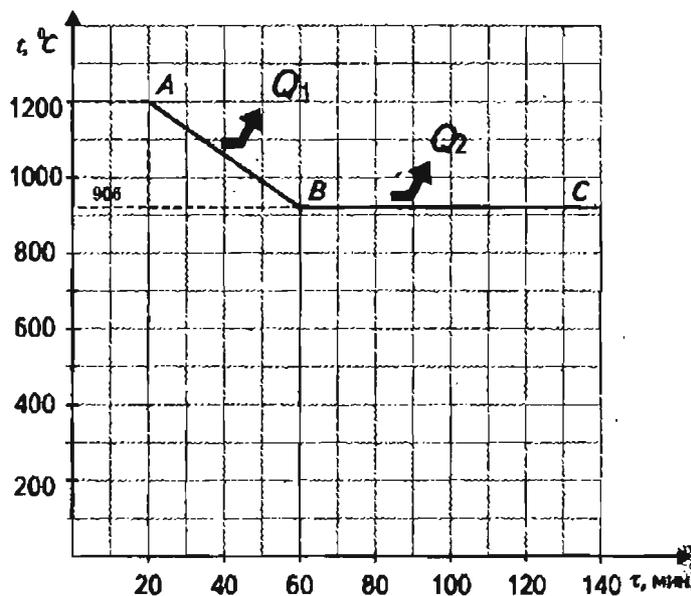


Рис. 40

- Используя график, определите состояние вещества на участках  $AB$  и  $BC$ .
- Используя табличные данные, определите какое это вещество.
- Что означает направление стрелок  $Q_1$  и  $Q_2$ ?
- Рассчитайте общее количество теплоты, отданное 0,5 кг этого вещества
- (Уровень В). На рис. 41 изображен график зависимости температуры тела от времени.
  - Используя график, определите состояние вещества на участках  $AB$ ,  $BC$  и  $CD$ . Какое это вещество?
  - Используя табличные данные, найдите: удельную теплоемкость вещества; удельную теплоту плавления для данного вещества.
  - Рассчитайте количество теплоты, необходимое для нагревания и плавления 5 кг этого вещества?

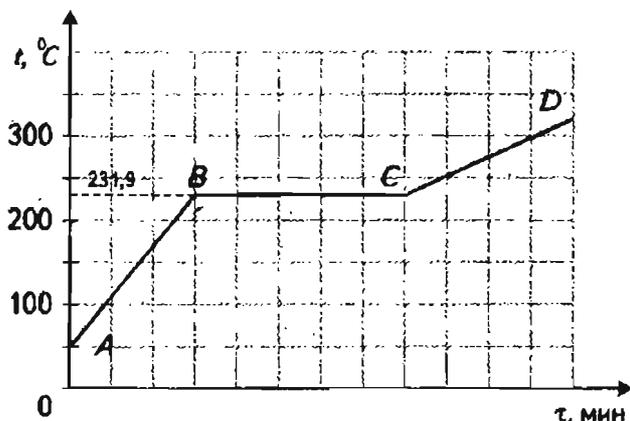


Рис. 41

Обратите внимание! В физике часто используется внесистемная единица количества теплоты: калория (кал) и килокалория (ккал).

$$1 \text{ кал} = 4,1868 \text{ Дж} \approx 4,2 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ ккал} = 4,1868 \cdot 10^3 \text{ Дж} \approx 4,2 \cdot 10^3 \text{ Дж}$$

### Самостоятельная работа 4.1

(выполняется в классе)

1. Какое количество теплоты выделится при полном сгорании 20 кг каменного угля?
2. Какое количество теплоты выделится при полном сгорании 50 л метана? Плотность метана примите равной  $0,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .
3. На стаканчике с йогуртом написано: энергетическая ценность 72 ккал. Выразите энергетическую ценность продукта в Дж.
4. Теплота сгорания суточного рациона питания для школьников вашего возраста составляет около 1,2 МДж.
  - 1) Достаточно ли для вас потребление в течение дня 100 г жирного творога, 50 г пшеничного хлеба, 50 г говядины и 200 г картофеля? Необходимые дополнительные данные вы найдете в табл. 12 справочного раздела.
  - 2) Достаточно ли для вас потребление в течение дня 100 г окуня, 50 г свежих огурцов, 200 г винограда, 100 г ржаного хлеба, 20 г подсолнечного масла и 150 г сливочного мороженого.
5. (Уровень В). При подготовке к урокам в течение двух часов вы тратите около 800 кДж энергии. Восстановите ли вы запас энергии, если выпьете 200 мл обезжиренного молока и съедите

50 г пшеничного хлеба? Плотность обезжиренного молока равна  $1036 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

6. (Уровень В). Воду из мензурки перелили в сосуд, нагреваемый пламенем спиртовки, и испарили (рис. 42). Рассчитайте массу сгоревшего спирта. Нагреванием сосуда и потерями на нагревание воздуха можно пренебречь. Необходимые данные вы можете получить из анализа рисунка и справочных таблиц.

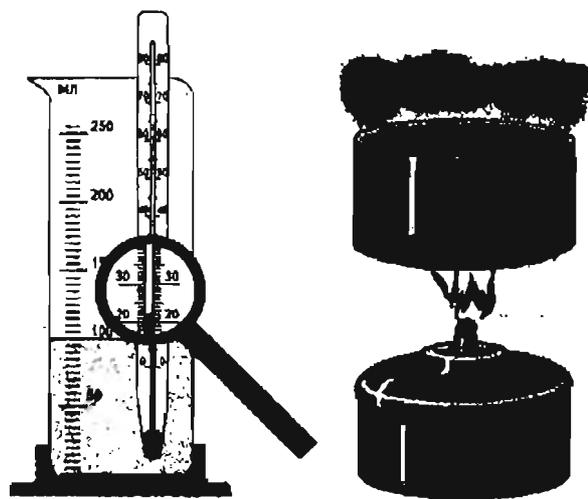


Рис. 41

### Самостоятельная работа 4.2

(выполняется дома)

1. Какое количество теплоты выделится при полном сгорании 1 т антрацита?
2. Какую массу биогаза надо сжечь, чтобы выделилось 50 МДж теплоты?
3. Какое количество теплоты выделится при сгорании 5 л мазута. Плотность мазута примите равной  $890 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .
4. На коробке конфет написано: калорийность 100 г 580 ккал. Выразите калорийность продукта в Дж.
5. (Уровень В). Изучите этикетки разных пищевых продуктов. Запишите энергетическую ценность (калорийность) продуктов, выразив ее в джоулях или калориях (килокалориях).

6. (Уровень В). При езде на велосипеде за 1 час вы тратите примерно 2 260 000 Дж энергии. Восстановите ли вы запас энергии, если съедите 200 г вишни?

Контрольные  
работы

### Контрольная работа №1 (уровень А, рассчитана на 20 минут)

#### Вариант 1

По графику зависимости температуры от времени, представленному на рис. 42, определите:

- 1) Какие процессы изображены на графике и для какого вещества? Ответ обоснуйте.
- 2) Сколько времени продолжался процесс охлаждения вещества в твердом состоянии?

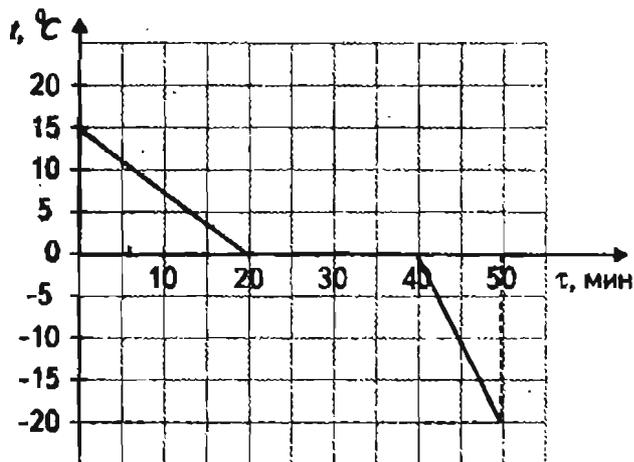


Рис. 42

#### Вариант 2

По графику зависимости температуры от времени, представленному на рис. 43, определите:

- 1) Какие процессы изображены на графике и для какого вещества? Ответ обоснуйте.
- 2) Сколько времени продолжался процесс нагревания вещества в твердом состоянии?

### Контрольная работа №2 (уровень Б, рассчитана на 30 минут)

#### Вариант 1

1. Объясните процесс плавления кристаллического тела на основе атомно-молекулярного учения о строении вещества.

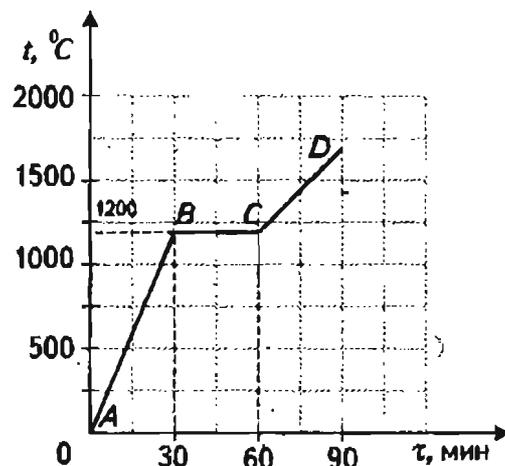


Рис. 43

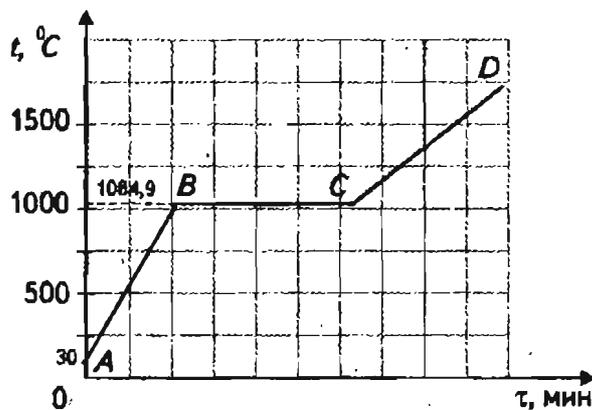


Рис. 44

2. На графике зависимости температуры от времени, представленном на рис. 44, показано изменение состояния вещества.
  - 1) Используя график, определите состояние вещества на участках AB, BC и CD.
  - 2) Чему равна температура на участке BC? Какое это вещество?
  - 3) На каждом из участков графика стрелками укажите направление теплообмена тела с окружающей средой. Получает или отдает тело тепло?
  - 4) Рассчитайте общее количество теплоты, необходимое для нагревания и плавления 5 кг данного вещества.

#### Вариант 2

1. Объясните процесс испарения жидкости на основе атомно-молекулярного учения о строении вещества.

2. На графике зависимости температуры от времени, представленном на рис. 45, показано изменение состояния вещества.

- Используя график, определите состояние вещества на участках  $AB$ ,  $BC$  и  $CD$ .
- Чему равна температура на участке  $BC$ ? Какое это вещество?
- На каждом из участков графика стрелками укажите направление теплообмена тела с окружающей средой. Получает или отдает тело тепло?
- Рассчитайте общее количество теплоты, отданное данным телом массой 3 кг на участках  $BC$  и  $CD$ .

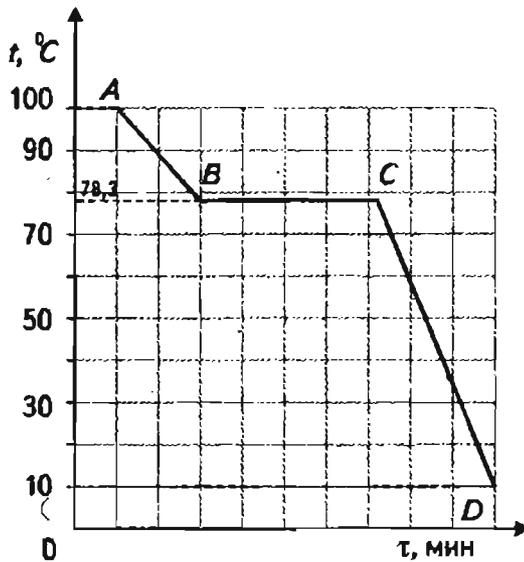


Рис. 45

### Контрольная работа №3 (уровень Б, рассчитана на 40 минут)

#### Вариант 1

- Объясните процесс отвердевания кристаллического тела на основе атомно-молекулярного учения о строении вещества.
- На графике зависимости температуры от времени, представленном на рис. 46, показано изменение состояния вещества.
  - Используя график, определите состояние вещества на участках  $AB$ ,  $BC$  и  $CD$ .
  - Что происходит с веществом на участке  $BC$ ? Какое это вещество?
  - На каждом из участков графика стрелками укажите направление теплообмена тела с окружающей средой. Получает или отдает тело тепло?

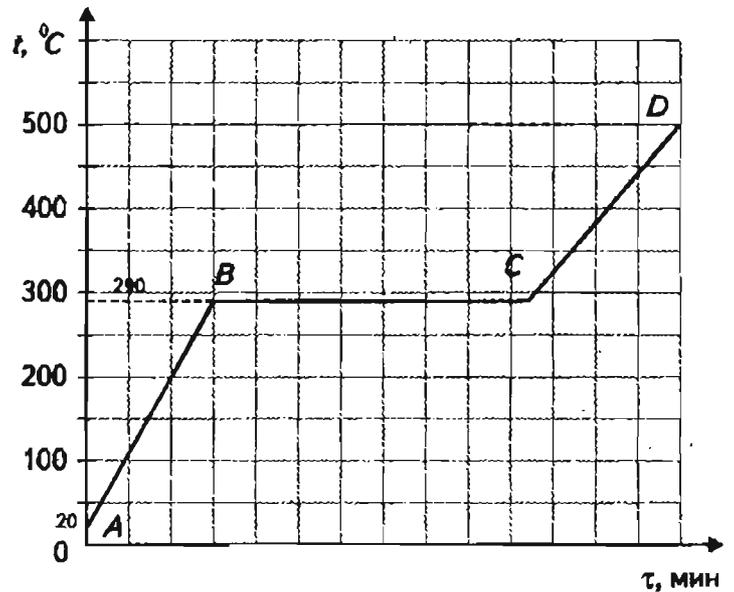


Рис. 46

- На каждом из участков графика стрелками укажите направление теплообмена тела с окружающей средой. Получает или отдает тело тепло?
- Рассчитайте общее количество теплоты, необходимое для нагревания и парообразования 2 кг данного вещества.
- Одинаковые ли количества теплоты выделяется при полном сгорании этилового спирта и подсолнечного масла равной массы? Ответ обоснуйте.

#### Вариант 2

- Объясните процесс конденсации на основе атомно-молекулярного учения о строении вещества.
- На графике зависимости температуры от времени, представленном на рис. 47, показано изменение состояния вещества.
  - Используя график, определите состояние вещества на участках  $AB$ ,  $BC$  и  $CD$ .
  - Что происходит с веществом на участке  $BC$ ? Какое это вещество?
  - На каждом из участков графика стрелками укажите направление теплообмена тела с окружающей средой. Получает или отдает тело тепло?

- 4) Рассчитайте общее количество теплоты, отданное данным телом массой 0,5 кг на участках  $BC$  и  $CD$ .

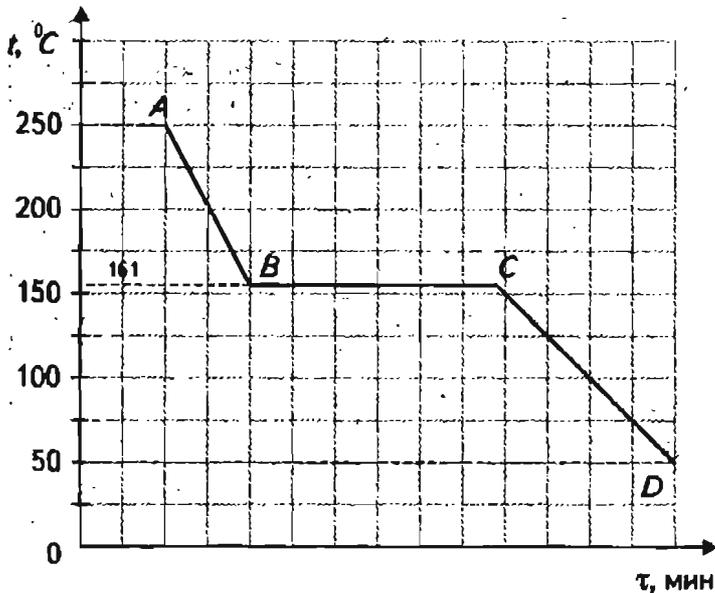


Рис. 47

3. Тела из свинца, серебра и меди равной массы нагрели в кипящей воде, а затем вынули и положили на кусок льда. Под каким из тел расплавится больше льда? Ответ обоснуйте.

*Для тех,*

*кому стало интересно*

Вероятно, многие из вас наблюдали высыхание влажного белья на морозе. Вначале оно замерзает, а затем лед испаряется и белье становится сухим.

Переход вещества из твердого состояния в газообразное, минуя жидкое состояние, называется *возгонкой* или *сублимацией* (от латинского слова *siblimo*, означающего *возношу*).

Сублимация характерна для йода, брома, нафталина, камфоры. Углекислый газ при нормальном атмосферном давлении не может существовать в жидком состоянии. Для него сублимация — обычный переход. Твердый углекислый газ называют «сухим льдом». Сухой лед получают путем сильного охлаждения и сжатия углекислого газа. Куски сухого льда вы, конечно, видели — они являются охладителем для мороженого. Температура твердой углекислоты  $-78,9^{\circ}\text{C}$ . Прилегающие к сухому льду слои воздуха быстро охлаждаются и могут снизить температуру до  $-70^{\circ}\text{C}$ . Твердая углекислота при комнатной температуре воздуха быстро испаряется, минуя жидкое состояние.

*Справочный  
раздел*

Таблица 1. Температура кипения различных веществ (при нормальном атмосферном давлении)

Вещество	Температура кипения, $^{\circ}\text{C}$
Азотная кислота безводная	86,0
Аммиак	-33,4
Ацетон	56,5
Вода-дистиллированная	100,0
Глицерин	290,0
Молоко цельное	100,2
Озон	-112,0
Оксид углерода	-78,48
Скипидар	161,0
Спирт метиловый	64,5
Спирт этиловый	78,3
Фреон - 12	-29,8
Эфир этиловый	34,5

Таблица 2. Температура кипения воды при различных давлениях

Давление $p \cdot 10^5$ , Па	Температура кипения, $^{\circ}\text{C}$
1	99,7
2	120,3
3	133,4
4	143,5
5	151,7
6	158,7
7	164,8
8	170,8
9	175,2
10	179,7

Таблица 3. Температура плавления различных веществ (при нормальном атмосферном давлении)

Вещество	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	Вещество	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$
Азот	- 210,0	Кровь	- 0,57
Алмаз	> 3500,0	Молоко цельное	- 0,6
Вода	0,0	Нафталин	80,3
Водород	- 259,2	Соль поваренная	770,0
Воздух	- 213,0	Спирт этиловый	- 114,7
Глицерин	18,0	Стеарин	71,6
Йод	113,5	Эфир этиловый	- 116,0
Кислород	- 218,4	Янтарь	> 350

Таблица 4. Температура плавления чистых веществ и сплавов (при нормальном атмосферном давлении)

Вещество	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	Вещество	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$
Чистые вещества		Сплавы	
Алюминий	660,4	Дуралюмин	$\approx 650$
Вольфрам	3420,0	Инвар	1425
Железо	1539,0	Карбид титана	3150
Калий	63,6	Константан	$\approx 1260$
Медь	1084,5	Латунь	$\approx 1000$
Натрий	97,8	Легкоплавкий сплав	60,5
Олово	231,9	Нейзильбер	$\approx 1100$
Платина	1772,0	Нихром	$\approx 1400$
Ртуть	-38,9	Сталь	$\approx 1400$
Свинец	327,5	Фехраль	$\approx 1460$
Цезий	28,4	Чугун	$\approx 1200$

Таблица 5. Удельная теплоемкость жидкостей (при нормальном атмосферном давлении и температуре 20 °C)

Жидкость	Удельная теплоемкость $c \cdot 10^3, \text{ Дж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$
Азотная кислота (100%)	1,72
Ацетон	2,2
Бензин авиационный	2,1
Вода дистиллированная	4,2
Вода морская	3,9
Глицерин	2,4
Керосин	2,1
Кефир	3,8
Масло касторовое	2,2
Масло подсолнечное рафинированное	1,8
Нафталин расплавленный (80 – 90 °C)	1,7
Ртуть	0,1
Скипидар	1,8
Сливки (35%)	3,5
Сметана	3,0
Спирт этиловый	2,5
Эфир этиловый	2,3

Таблица 6. Удельная теплоемкость некоторых твердых веществ (при температуре 20 °С)

Химический элемент, вещество	Удельная теплоемкость $c \cdot 10^3$ , Дж/кг·°С
Алюминий	0,9
Бериллий	1,8
Вольфрам	0,1
Железо	0,5
Золото	0,1
Медь	0,4
Титан	0,6
Углерод (графит)	0,7
Цинк	0,9
Асфальт	0,9
Бетон	0,9
Бумага	0,9
Гранит	0,8
Дерево (ель, сосна)	2,7
Кирпич	0,8
Латунь	0,4
Олово	0,2
Парафин	2,9
Пробка	2,0
Свинец (0°С)	0,1
Сталь	0,5
Стекло оконное	0,7
Стекло лабораторное	0,8
Чугун	0,5
Уголь древесный	1,0
Шифер	0,8
Эбонит	1,4

Таблица 7. Удельная теплоемкость некоторых овощей, фруктов и ягод (ориентировочные значения)

Продукт	Удельная теплоемкость $c \cdot 10^3$ , Дж/кг·°С
Абрикосы	3,8
Апельсины	3,8
Арбуз	3,9
Вишня	3,6
Калуста поздняя	3,9
Картофель поздний	3,4
Клубника	3,8
Морковь	3,8
Огурцы	4,0
Помидоры	4,0
Смородина черная	3,6
Яблоки	3,8

Таблица 8. Удельная теплоемкость некоторых продовольственных продуктов

Продукт	Удельная теплоемкость $c \cdot 10^3$ , Дж/кг·°С
Ветчина	2,1
Масло сливочное	3,0
Мясо говяжье (жирное)	2,5
Рыба жирная	3,0
Сахар	1,3
Творог	3,2
Телятина (жирная)	3,2
Хлеб формовой (мякиш)	2,8
Хлеб формовой (корка)	1,7

Таблица 9. Удельная теплота парообразования различных веществ (при температуре кипения и нормальном атмосферном давлении)

Вещество	Температура кипения, °С	Удельная теплота парообразования $\lambda \cdot 10^3$ , Дж/кг
Азот	- 195,8	199,3
Алюминий	2520,0	9210,0
Вода дистиллированная	100,0	2256,0
Водород	- 252,8	454,0
Воздух	от - 192 до - 195	197,0
Глицерин (при 100 °С)	290,0	830,0
Метан	- 161,5	511,0
Ртуть	356,7	293,1
Свинец	1745,0	860,0
Соплидар	161,0	287,2
Серебро	2443,0	2177
Спирт этиловый	78,3	906,0
Цинк	906,0	1800,0

Таблица 10. Удельная теплота плавления различных веществ (при температуре плавления и нормальном атмосферном давлении)

Вещество	Температура плавления, °С	Удельная теплота плавления $\lambda \cdot 10^3$ , Дж/кг
Азот	- 210,0	25,9
Алюминий	660,6	393,0
Ацетон	- 95,0	96,3
Бром	- 7,2	67,8
Вода (лед)	0,0	332,4
Водород	- 259,2	58,6
Вольфрам	3421,0	185,0
Воск	61 - 64	176,0
Железо	1539,0	270,0
Магний	648,8	372,6
Медь	1084,9	213,0
Олово	232,0	58,2
Парафин	38 - 56	147,0
Ртуть	- 38,9	11,7
Свинец	327,5	24,3
Серебро	961,9	87,3
Цезий	28,4	15,9
Цинк	419,6	112,2
Эфир этиловый	- 116,0	113

Таблица 11. Удельная теплота сгорания различных видов топлива

Вид топлива	Удельная теплота сгорания $q \cdot 10^3$ , Дж/кг
Твердое	
Антрацит	26 800 – 31 400
Бурый уголь	15 700
Дрова (30% влажности)	12 300
Каменный уголь	20 900 – 30 150
Сланцы горючие	7330 – 15 100
Твердое ракетное топливо	4190 – 10 500
Торф в брикетах	15 100
Жидкое	
Бензин авиационный	43 500 – 44 400
Дизельное топливо	42 700
Мазут	38 900 – 39 800
Спирт этиловый	26 000
Газообразное	
Водород	119 700
Доменный газ	3 100
Биогаз	25 000
Коксовый газ	8080
Метан	49 800
Природный газ (на 90% из метана)	45 600

Таблица 12. Удельная теплота сгорания пищевых продуктов

Продукт	Удельная теплота сгорания $q \cdot 10^3$ , Дж/кг
Хлеб	
Хлеб ржаной	8884
Хлеб пшеничный	9261

Таблица 12 (продолжение)

Продукт	Удельная теплота сгорания $q \cdot 10^3$ , Дж/кг
Мясо-молочные продукты	
Баранина	9537
Говядина	7524
Кефир, простокваша	2700
Масло сливочное	32690
Молоко	2796
Мясо курицы	5380
Творог жирный	9755
Рыба	
Окунь	3520
Щука	3500
Овощи	
Картофель	3776
Морковь	1720
Огурцы свежие	572
Редис	1050
Фрукты, ягоды	
Виноград	2400
Вишня	2625
Земляника	1730
Малина	1920
Смородина черная	2470
Черника	1820
Яблоки средней полосы	2010
Прочие продукты	
Масло подсолнечное	38900
Мед	14980
Мороженое сливочное	7498
Сахар	17150
Яйцо	6904

# Кинетическая теория газов



## Изучив эту тему,

- ♦ вы познакомитесь с основными характеристиками частиц; признаками, которыми наделяется идеальный газ; с основным уравнением кинетической теории газа и его следствиями;
- ♦ узнаете формулы расчета давления, средней квадратичной скорости движения частиц, средней кинетической энергии поступательного движения частиц и др.;
- ♦ научитесь решать графические задачи, расчетные задачи на использование уравнения состояния газа и частных газовых законов и др.

## Основные понятия:

- ♦ Идеальный газ ♦ Давление, оказываемое газом на стенки сосуда ♦ Средняя кинетическая энергия поступательного движения частиц ♦ Изопроцессы в газах

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

Молекулярная физика изучает и объясняет свойства систем, обусловленные тепловым движением частиц (атомов, молекул и др.), но не связанные с изменением состава вещества и перестройкой самих частиц. Кинетическая теория газов исследует свойства газов на основе представления об их молекулярном строении и определенном законе взаимодействия между молекулами.

Нас окружает огромный мир молекул. Молекулы могут существенно отличаться друг от друга по форме, размерам, массе. Одни молекулы по форме близки к шару, другие похожи на диск, третьи имеют форму палочки или длинной цепочки, каждое звено которой состоит из отдельных атомов или их групп. В дальнейшем мы будем принимать молекулы или атомы за шарики.

**Молярная масса ( $M$ )** — масса вещества, взятая в количестве одного моля (масса 1 моля вещества).

$$[M] = \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

**Постоянная Авогадро ( $N_A$ )** — число атомов или молекул в моле любого вещества.

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

**Количество вещества ( $\nu$ )** — отношение числа молекул (атомов) в данном теле к числу молекул (атомов) в моле вещества.

$$[\nu] = \text{моль}$$

**Моль** равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов (атомов, молекул, ионов и др.), сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг.

### Сведения о частицах

Линейные размеры частиц (диаметр)  $d_0$ :  $\sim 10^{-10}$  м.

Масса частиц  $m_0$ :  $\sim 10^{-25} - 10^{-27}$  кг.

Расстояние между атомами в молекулах: 1–4 Å.

$$1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ м}$$

### Идеальный газ

При описании процессов в газах используется модель реального газа — **идеальный газ**.

Основные признаки (свойства), которыми наделяется идеальный газ:

1. Молекулы идеального газа имеют пренебрежимо малые размеры по сравнению со средними расстояниями между ними.
2. Молекулы идеального газа рассматриваются как очень маленькие твердые шарики, обладающие массой (т. е. молекулы идеального газа можно считать материальными точками).
3. Силами притяжения между молекулами можно пренебречь, силы отталкивания проявляются лишь на ничтожно малых интервалах времени,

когда молекулы вследствие теплового движения приближаются друг к другу на расстояния, сравнимые с диаметром самих молекул.

4. В идеальном газе потенциальной энергией молекул можно пренебречь; учитывается только средняя кинетическая энергия поступательного движения частиц.

### Основные расчетные формулы

$$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}$$

Количество вещества:

$$m = m_0 \cdot N = \nu \cdot M = \frac{N}{N_A} \cdot M$$

Масса вещества:

$$N = \frac{m}{M} \cdot N_A = \nu \cdot N_A = \frac{m}{m_0}$$

Число частиц:

$$p = \frac{1}{3} n \cdot m_0 \cdot \bar{v}^2 = \frac{1}{3} \rho \cdot \bar{v}^2 = \frac{2}{3} n \cdot \bar{E} = n \cdot k \cdot T$$

Давление, оказываемое газом на стенки сосуда:

Здесь:

$\bar{v}^2$  — средний квадрат проекции скорости на произвольное направление;

$\rho$  — плотность газа;

$n$  — концентрация газа — число частиц в единице объема,  $n = \frac{N}{V}$ ;

$k$  — постоянная Больцмана,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ ;

$T$  — температура газа по шкале Кельвина.

Связь температуры по шкале Цельсия и Кельвина:

$$T = t \text{ } ^\circ\text{C} + 273 \text{ } ^\circ\text{C}; \Delta T = \Delta t.$$

Средняя кинетическая энергия поступательного движения частиц (атомов, молекул):

$$\bar{E} = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT$$

Средняя квадратичная скорость частиц:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

Здесь:

$R$  — молярная газовая постоянная;

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

Уравнение Менделеева—Клапейрона:

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot RT$$

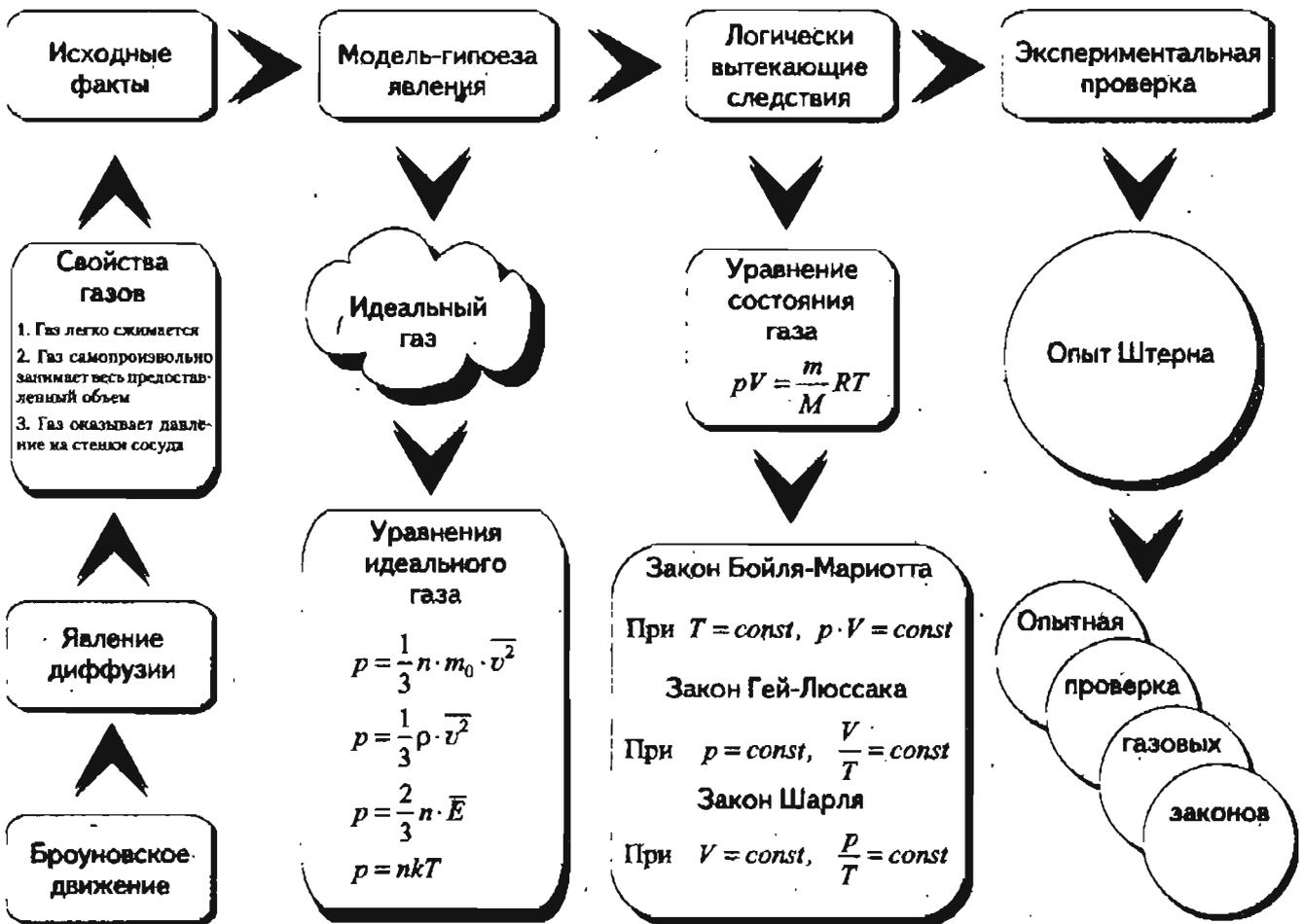
Уравнение Клапейрона:

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{const}$$

Закон Дальтона:

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n$$

## СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ТЕМЫ «Кинетическая теория газов»



## ИЗОПРОЦЕССЫ В ГАЗАХ

Название процесса	Постоянный параметр	Математическая запись закона	Графики процессов в системе координат $p-V$ , $p-T$ , $V-T$
Изотермический	$T = const$	$p \cdot V = const$	 <p>Изотермическое расширение</p> <p>Изотермическое сжатие</p>
Изобарный	$p = const$	$\frac{V}{T} = const$	 <p>Изобарное расширение (нагревание)</p> <p>Изобарное сжатие (охлаждение)</p>
Изохорный	$V = const$	$\frac{p}{T} = const$	 <p>Изохорное нагревание</p> <p>Изохорное охлаждение</p>

*Практикум по  
решению задач*

На графике (рис. 48) изображен процесс изменения состояния определенной массы газа. Используя график:

- 1) назовите процессы;
- 2) напишите уравнения для процессов 1–2, 2–3 и 3–1;
- 3) изобразите графики процессов изменения состояния газа в системах координат  $p-T$  и  $V-T$ .

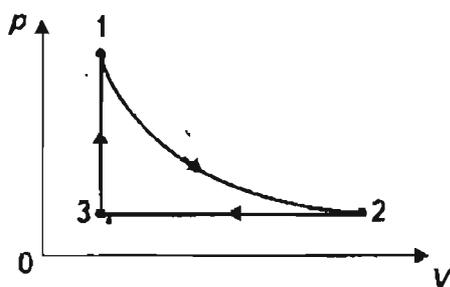


Рис. 48

Решение

1. На участке 1–2:

изотермическое расширение —  $T = const$ ;

по закону Бойля-Мариотта  $p \sim \frac{1}{V}$ .

- На участке 2–3:

изобарное сжатие (охлаждение) —  $p = const$ ;

по закону Гей-Люссака  $V \sim T$ .

- На участке 3–1:

изохорное нагревание —  $V = const$ ;

по закону Шарля  $p \sim T$ .

2. Для процесса 1–2:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad \text{или} \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

- Для процесса 2–3:

$$\frac{V_2}{T_2} = \frac{V_3}{T_3} \quad \text{или} \quad \frac{V_2}{V_3} = \frac{T_2}{T_3}$$

- Для процесса 3–1:

$$\frac{p_3}{T_3} = \frac{p_1}{T_1} \quad \text{или} \quad \frac{p_3}{p_1} = \frac{T_3}{T_1}$$

3. Строим графики (рис. 49).

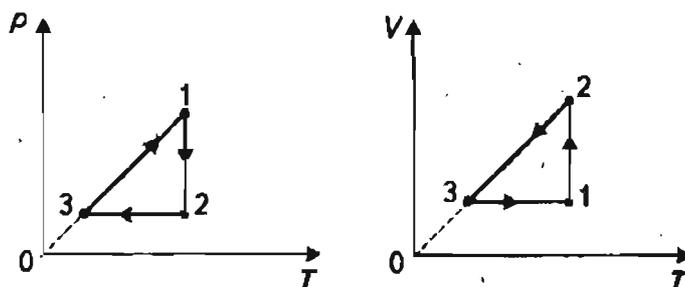


Рис. 49

*Самостоятельные  
работы*

**Самостоятельная работа 1.1**

(выполняется в классе, рассчитана на 40 минут)

1. Рассчитайте число молекул, содержащихся в 1 г гелия.
2. Какова масса 50 молей углекислого газа?
3. Рассчитайте массу  $2 \cdot 10^{23}$  молекул азота.
4. Сколько молекул содержится в  $5 \text{ м}^3$  олова?

Плотность олова  $7300 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

5. (Уровень Б). На изделие, поверхность которого  $20 \text{ см}^2$ , нанесли слой серебра толщиной  $1 \text{ мкм}$ . Сколько атомов серебра содержится в покрытии? Плотность серебра  $10,5 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

6. (Уровень Б). Сравните число атомов, из которых состоят серебряная и алюминиевая ложки равного объема. Плотность серебра  $10,5 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , а алюминия —  $2,7 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

**Самостоятельная работа 1.2**

(выполняется дома, рассчитана на 30 минут)

1. Рассчитайте массу молекулы кислорода.
2. Какое количества вещества содержится в алюминиевой отливке массой  $5,4 \text{ кг}$ ?
3. Какова масса 20 молей ацетона  $\text{C}_2\text{H}_2$ ?
4. (Уровень Б). Сравните массы тел, сделанных из олова и свинца, если они содержат равные количества вещества.

**Самостоятельная работа 2.1**

(выполняется в классе, рассчитана на 40 минут)

1. В сосуде вместимостью  $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  находится водород массой  $1 \text{ кг}$  под давлением  $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Чему равна средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул?
2. В баллоне вместимостью  $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  находится  $1 \text{ моль}$  газа. Какова концентрация молекул в баллоне? Рассчитайте концентрацию молекул в баллоне, если в нем осталась половина массы газа.
3. Концентрация молекул идеального газа уменьшилась в четыре раза, а средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул увеличилась в четыре раза. Что можно сказать о давлении газа? Ответ обоснуйте.
4. Рассчитайте концентрацию молекул газа при нормальных условиях.
5. Изменится ли давление идеального газа на стенки сосуда, если концентрация его молекул уменьшится в четыре раза, а средняя квадратичная скорость молекул увеличится в четыре раза? Ответ обоснуйте.
6. (Уровень Б). Средняя квадратичная скорость молекул метана при нормальном атмосферном давлении равна  $651 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Какова концентрация молекул метана? Масса молекулы метана равна  $26,6 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ .
7. Можно ли говорить о концентрации применительно к одной молекуле?
8. Можно ли говорить о температуре одной или нескольких молекул?

**Самостоятельная работа 2.2**

(выполняется дома, рассчитана на 25 минут)

1. Кислород массой  $0,32 \text{ кг}$  занимает объем  $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ . Рассчитайте концентрацию молекул.
2. Рассчитайте давление, оказываемое молекулами азота на стенки сосуда, если средний квадрат скорости движения его молекул  $\overline{v^2} = 0,5 \cdot 10^6 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}$ .  
Плотность азота равна  $1,25 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

3. Температура газа  $30^\circ \text{C}$ . Концентрация молекул  $10^{25} \text{ м}^{-3}$ . Под каким давлением находится газ?
4. Масса молекулы озона равна  $80 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ . Рассчитайте среднюю квадратичную скорость молекул этого газа при  $27^\circ \text{C}$ .

**Самостоятельная работа 3.1**

(выполняется в классе, рассчитана на 80 минут)

1. На рис. 50 изображены процессы изменения состояния определенной массы газа.

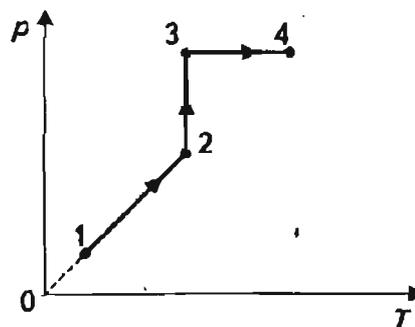


Рис. 50

Используя рисунок,

- а) назовите процессы;
  - б) напишите уравнение для процесса 2 — 3;
  - в) изобразите графики процессов в системах координат  $p - V$  и  $V - T$ .
2. На рис. 51 изображены процессы изменения состояния определенной массы газа.

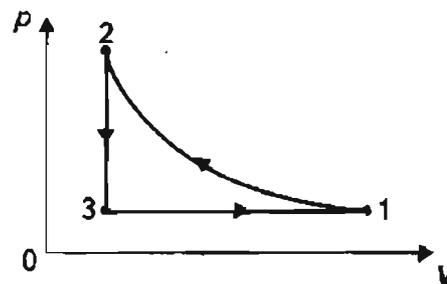


Рис. 51

Используя рисунок,

- а) назовите процессы;
- б) напишите уравнение для процесса 3 — 1;
- в) изобразите графики процессов в системах координат  $p - T$  и  $V - T$ .

3. На графике (рис. 52) изображена изобара кислорода. Какому давлению она соответствует, если масса кислорода 0,1 кг?

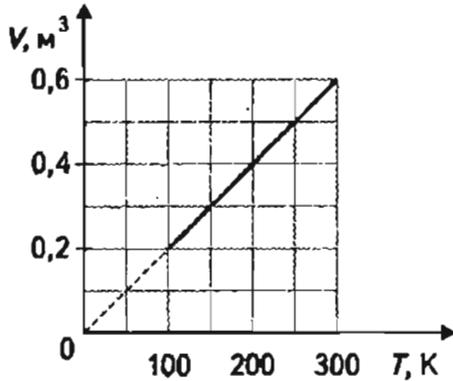


Рис. 52

4. При каком давлении 1 моль идеального газа имеет температуру 177 °С? Объем газа 1 л.
5. (Уровень Б). Температура поверхностного слоя Солнца (фотосферы) около 6000 К. Фотосфера в основном состоит из атомов водорода. Смогут ли все атомы водорода улететь с поверхности Солнца? Вторая космическая скорость для Солнца равна  $6,1 \cdot 10^5 \frac{м}{с}$ .
6. (Уровень Б). Найдите отношение средних квадратичных скоростей молекул гелия He и азота N<sub>2</sub> при одинаковых температурах.
7. В баллонах для акваланга находится воздух при 30 °С и давлении  $150 \cdot 10^5$  Па. При погружении аквалангиста в море, где температура 5 °С, температура воздуха в баллонах понизилась и стала равной температуре окружающей среды. Рассчитайте давление воздуха в баллонах при этой температуре. Объем воздуха считайте постоянным.
8. При сжатии воздуха в компрессоре температура повысилась от 300 К до 380 К, а давление возросло в 2,5 раза. Рассчитайте степень сжатия воздуха (отношение начального объема воздуха к конечному).
9. Со дна водоема поднимается пузырек воздуха. У поверхности его объем оказывается в 3 раза больше, чем на дне. Какова глубина водоема? Атмосферное давление считать нормальным,

температуру в водоеме на различной глубине — постоянной.

10. Имеется два сосуда с газом: один вместимостью 3 л, другой — 4 л. В первом сосуде газ находится под давлением 2 атм., а во втором — 1 атм. Температура обоих сосудов одинакова. Под каким давлением будет находиться газ, если сосуды соединить между собой?
11. (Уровень В). В сосуде находится молекулярный азот N<sub>2</sub> при температуре 27 °С. Сосуд нагревают до температуры 1500 °С. При этой температуре 30% молекул азота диссоциировало на атомы. Во сколько раз возрастает давление в сосуде при его нагревании?
12. (Уровень В). В центре закрытой с торцов трубы длиной 2l находится поршень массой m и площадью сечения S, который может без трения перемещаться по трубе. Слева и справа от поршня имеется газ. Давление, оказываемое газом, равно p. Трубу раскручивают в горизонтальной плоскости вокруг оси, проходящей через ее центр. Рассчитайте угловую скорость вращения, если поршень сместился на  $\frac{l}{2}$ . Температуру газа считайте постоянной. Массой газа следует пренебречь.

**Самостоятельная работа 3.2**  
(выполняется дома)

1. В таблице приведены значения параметров состояния газа. Определите недостающие параметры.

	m, кг	M, кг/моль	p, Па	V, м³	T, К
1	2,4	0,040	—	0,4	200
2	0,3	0,028	$8,3 \cdot 10^4$	—	280
3	0,16	0,004	$6,0 \cdot 10^4$	0,83	—

2. Чему равна средняя квадратичная скорость хаотического движения молекул азота при 7 °С?
3. На рис. 53 изображены процессы изменения состояния определенной массы газа,

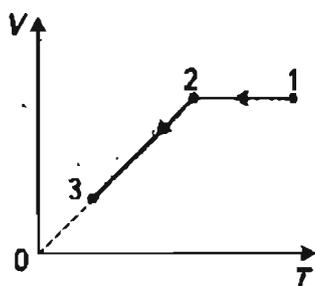


Рис. 53

Используя рисунок,

- назовите процессы;
  - напишите уравнение для процесса 1 — 2;
  - изобразите графики процессов в системе координат  $p - T$  и  $p - V$ .
4. На рис. 54 изображена изохора. Какому объему газа она соответствует, если масса водорода 8 кг?

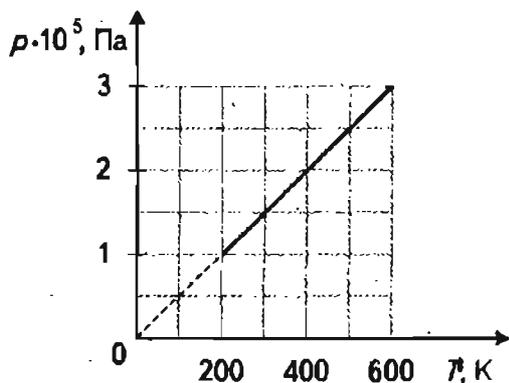


Рис. 54

- Какое количества вещества содержится в газе, если при давлении 200 кПа и температуре 240 К его объем равен 40 л?
- Объем водорода при 0 °С и давлении  $10^5$  Па равен  $2 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>. Какой объем будет занимать та же масса водорода при температуре 50 °С и давлении  $0,98 \cdot 10^5$  Па?
- Рассчитайте среднюю квадратичную скорость молекул газа, если имея массу 6 кг, он занимает объем 4,9 м<sup>3</sup> при давлении 200 кПа.
- На рис. 55 изображены изменения состояния определенной массы газа. Изобразите графики процессов в системах координат  $p - T$  и  $V - T$ .

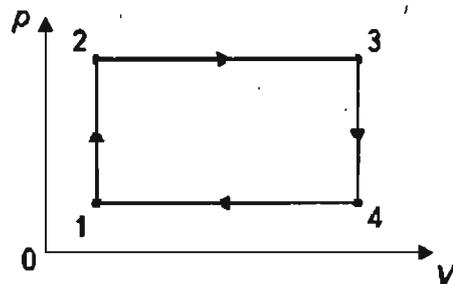


Рис. 55

*Контрольная работа*

### Контрольная работа №1

(уровень А, рассчитана на 40 мин)

#### Вариант 1

- Ночью при температуре 5 °С давление в камере колеса автомобиля было  $2,00 \cdot 10^5$  Па. Каким будет давление в шине днем при температуре 25 °С? Объем шины при изменении температуры считайте неизменным.
- Концентрация молекул газа в сосуде уменьшилась в 4 раза, а средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул увеличилась в 2 раза. Изменилось ли давление газа? Ответ обоснуйте.
- На рис. 56 изображен процесс изменения состояния определенной массы газа.

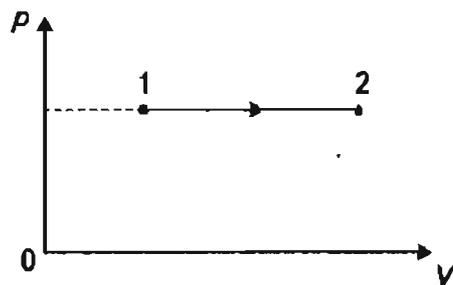


Рис. 56

Используя рисунок,

- назовите процесс;
- напишите уравнение связи между параметрами;
- изобразите графики процессов изменения газа в системах координат  $p - T$  и  $V - T$ .

4. Объясните способность газа занимать весь предоставленный объем.

### Вариант 2

1. Чему равна масса  $10^{22}$  молекул озона?
2. При изобарном процессе концентрация газа в сосуде увеличилась в пять раз. Во сколько раз изменится средняя кинетическая энергия молекул? Ответ обоснуйте.
3. На рис. 57 изображен процесс изменения состояния определенной массы газа.

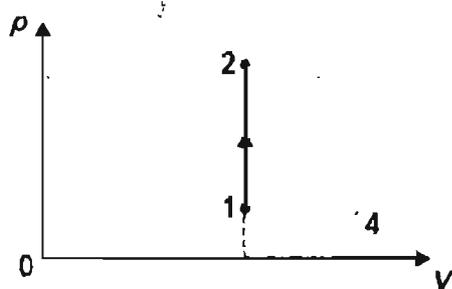


Рис. 57

Используя рисунок,

- а) назовите процесс;
  - б) напишите уравнение связи между параметрами;
  - в) изобразите графики процессов изменения газа в системах координат  $p - T$  и  $V - T$ .
4. Объясните способность газа оказывать давление на стенки сосуда.

### Контрольная работа № 2

(уровень Б, рассчитана на 40 минут)

#### Вариант 1

1. Насос с закрытым выходным отверстием содержит под поршнем воздух объемом  $80 \text{ см}^3$  при давлении  $760 \text{ мм рт. ст.}$  и температуре  $7^\circ\text{C}$ . При быстром сжатии воздуха до  $38 \text{ см}^3$  температура поднялась до  $28^\circ\text{C}$ . Каково давление сжатого воздуха?
2. Когда из баллона выпустили некоторое количество газа, давление в нем упало на  $\Delta p = 0,35p$ , а температура понизилась на  $\Delta T = 0,15T$  (здесь

$p$  и  $T$  — начальные давление и температура). Какая часть газа осталась в баллоне?

3. Два сосуда, наполненные воздухом под давлением  $p_1 = 8 \cdot 10^5 \text{ Па}$  и  $p_2 = 6 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , имеют объем  $V_1 = 3 \text{ л}$  и  $V_2 = 5 \text{ л}$ . Сосуды соединяют трубкой, объемом которой можно пренебречь по сравнению с объемами сосудов. Рассчитайте установившееся давление в сосудах, если температура воздуха в них была одинакова и после установления равновесия не изменилась.
4. Рассчитайте плотность кислорода при температуре  $300 \text{ К}$  и давлении  $1,6 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Плотность кислорода при нормальных условиях  $1,43 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , нормальное атмосферное давление  $1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .
5. Идеальный газ участвует в некотором процессе, изображенном на рис. 58 в координатах  $p - V$ . Изобразите эти процессы в координатах  $p - T$  и  $V - T$ .

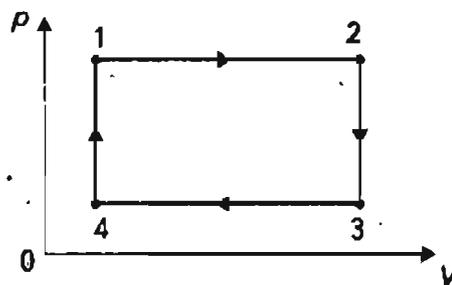


Рис. 58

#### Вариант 2

1. Сколько частиц воздуха находится в комнате площадью  $20 \text{ м}^2$  и высотой  $3 \text{ м}$  при температуре  $17^\circ\text{C}$  и давлении  $752 \text{ мм рт. ст.}$ ?
2. В баллоне вместимостью  $V = 6,5 \text{ л}$  находится газ массой  $m = 13,4 \text{ г}$  под давлением  $240 \text{ кПа}$ . Рассчитайте среднюю квадратичную скорость молекул газа.
3. Два сосуда с объемами  $V_1 = 40 \text{ л}$  и  $V_2 = 20 \text{ л}$  содержат газ при одинаковой температуре, но разных давлениях. После соединения сосудов в них установилось давление  $p = 1 \text{ МПа}$ . Каково было начальное давление газа  $p_1$  в большем сосуде, если в меньшем оно было равно  $p_2 = 600 \text{ кПа}$ ? Температуру газа считайте постоянной.

4. Парообразование при кипении происходит при постоянной температуре, а парообразование при испарении — с понижением температуры. Чем это обусловлено? Ответ обоснуйте на основе кинетической теории газов.
5. На рис. 59 изображено изменение состояния идеального газа в системе координат  $p - V$ . Изобразите графики процессов изменения состояния газа в системе координат  $p - T$  и  $V - T$ .

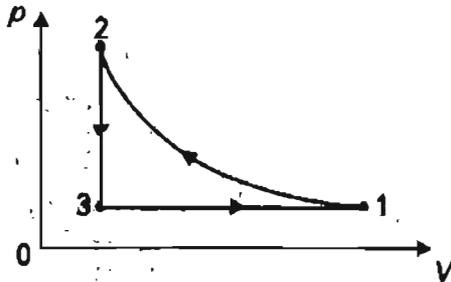


Рис. 59

*Справочный  
раздел*

**Некоторые постоянные, используемые в молекулярной физике и термодинамике**

$$\text{Постоянная Авогадро } N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \approx 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

$$\text{Постоянная Больцмана } k = 1,3807 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \approx 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

$$\text{Молярная газовая постоянная } R = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \approx 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

Нормальные условия:

$$\text{атмосферное давление } p_0 = 101325 \text{ Па} \approx 10^5 \text{ Па};$$

$$\text{температура } t = 0 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Объем моля идеального газа при нормальных условиях:  $V_m = 2,4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}.$

$$\text{Молярная масса воздуха: } M = 29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}.$$

Таблица 1. Диаметр молекул различных веществ

Вещество	Химическая формула	Диаметр молекулы $d, 10^{-10}, \text{ м}$
Азот	$N_2$	3,7
Вода	$H_2O$	3,0
Водород	$H_2$	2,8
Кислород	$O_2$	3,6
Оксид серы (IV)	$SO_2$	3,4
Хлор	$Cl_2$	3,7

Таблица 2. Расстояния между атомами в молекулах различных веществ

Вещество	Химическая формула	Расстояние между атомами $R \cdot 10^{-10}, \text{ м}$
Азот	$N_2$	1,09
Водород	$H_2$	0,7
Кислород	$O_2$	1,21
Сера (пары)	$S_2$	1,89
Хлор	$Cl_2$	1,99

Таблица 3. Массы атомов и молекул некоторых веществ

Название	Химическая формула	Масса $m, 10^{-27}, \text{ кг}$
Атомы		
Азот	N	23,2
Алюминий	Al	44,8
Водород	H	1,67
Железо	Fe	92,8
Кислород	O	26,6
Медь	Cu	105,0
Ртуть	Hg	333
Углерод	C	19,9
Хлор	Cl	58,9
Молекулы		
Азот	$N_2$	46,5
Аммиак	$NH_3$	28,3
Водород	$H_2$	3,3
Воздух	—	48,1
Карбонат кальция	$CaCO_3$	166,0
Кислород	$O_2$	53,2
Хлорид натрия	NaCl	97,0
Нафталин	$C_{10}H_8$	216,0



# Основы термодинамики

## Изучив эту тему,

- вы познакомитесь с законами термодинамики, уравнением теплового баланса, уравнениями адиабаты;
- узнаете формулы расчета внутренней энергии идеального газа, работы при изобарном процессе, КПД теплового двигателя;
- научитесь применять первый закон термодинамики к тепловым процессам, решать графические и расчетные задачи.

## Основные понятия:

- Внутренняя энергия
- Работа при изобарном процессе
- КПД теплового двигателя
- Адиабатный процесс

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

Термодинамический метод позволяет изучать свойства веществ, не рассматривая их внутреннее строение. В его основе лежат законы энергетических превращений.

Сумма энергии хаотического (теплового) движения всех частиц тела и энергии взаимодействия этих частиц называется **внутренней энергией**.

$$U = E_p + E_k$$

Для реального газа *внутренняя энергия — функция температуры и объема.*

$$U = U(T, V)$$

Для идеального газа *внутренняя энергия — функция температуры.*

$$U = U(T)$$

Внутренняя энергия идеального газа рассчитывается по формуле  $U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} \cdot RT$ , где:

- $i = 3$  — для одноатомного газа;  
 $i = 5$  — для двухатомного газа;  
 $i = 6$  — для многотомных газов;

Изменение внутренней энергии одноатомного идеального газа определяется по формулам:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M} \cdot R \Delta T$$

или

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot \frac{\Delta m}{M} \cdot R T$$

Работу при изобарном процессе можно рассчитать по формулам:

$$A = \pm p \Delta V, \quad A = \pm \frac{m}{M} \cdot R \Delta T, \quad A = \pm \frac{\Delta m}{M} \cdot R T$$

Графически работа в термодинамике определяется площадью фигуры, заключенной между линией графика, осью абсцисс и двумя ординатами.

На рис. 60 а и 60 б представлен изобарный процесс, на рис. 60 в, 60 г, 60 д и 60 е — процесс не изобарный.

### Законы термодинамики

«Нулевое» начало термодинамики определяет существование температуры — параметра, единого для всей системы, находящейся в термодинамическом равновесии.

Первое начало термодинамики (первый закон термодинамики — закон сохранения энергии для систем, в которых существенную роль играют тепловые процессы): *изменение внутренней энергии системы при переходе ее из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе.*

$$\Delta U = A_{\text{вн.с.}} + Q$$

$\Delta U$  — изменение внутренней энергии;

$A_{\text{вн.с.}}$  — работа внешних сил,

$Q$  — количество теплоты, переданное системе.

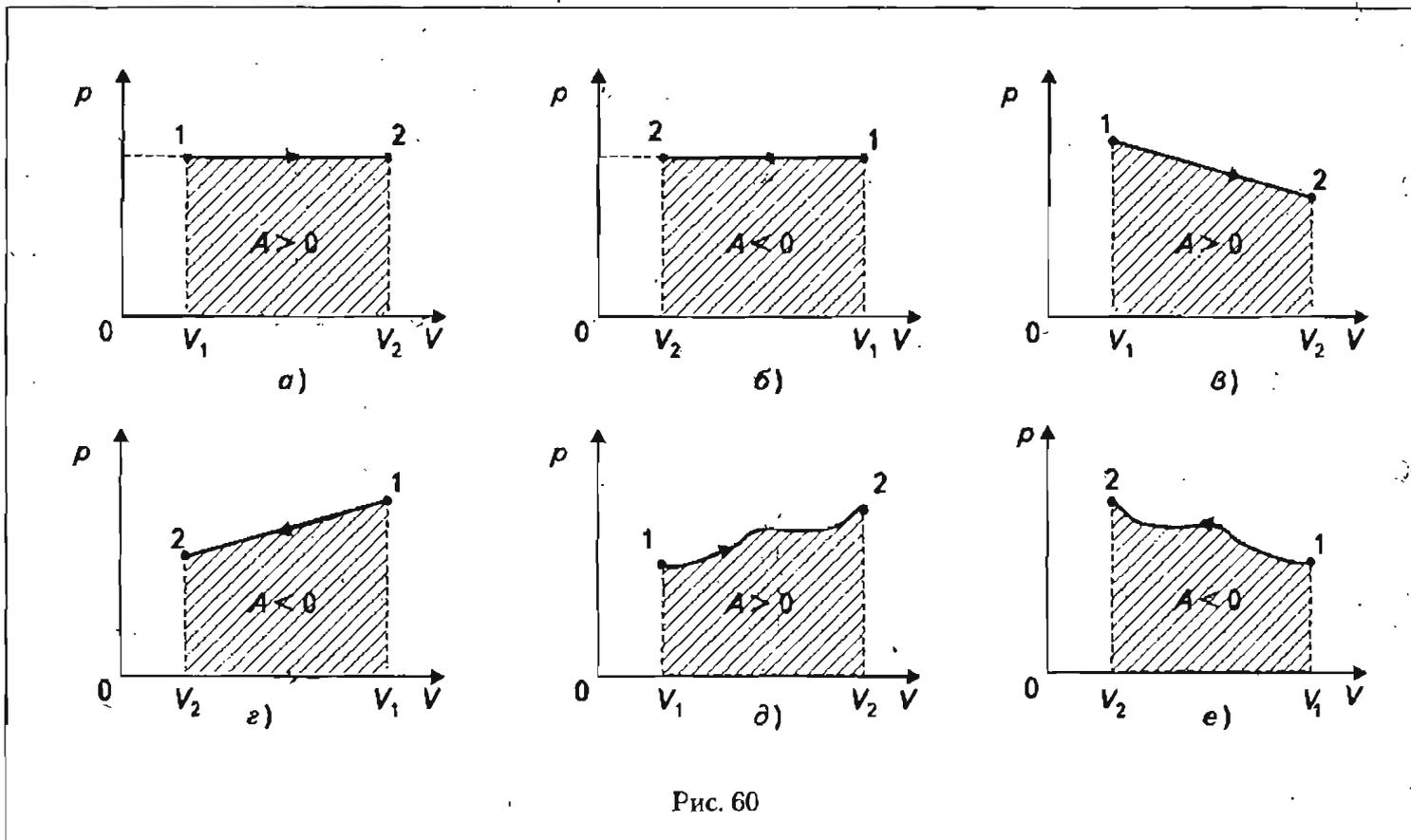


Рис. 60

Вместо работы внешних сил над системой часто рассматривается работа самой системы (газа, пара) над внешними силами ( $A_{\text{сист.}}$ ). Работы равны по абсолютному значению, но противоположны по знаку. По договоренности:

$$\begin{aligned} A_{\text{сист.}} &> 0 \\ A_{\text{вн.с.}} &< 0. \\ A_{\text{сист.}} &= -A_{\text{вн.с.}} \end{aligned}$$

Учитывая это соотношение, запишем первый закон термодинамики в следующем виде:

$$Q = \Delta U + A_{\text{сист.}}$$

Количество теплоты, переданное системе, идет на изменение ее внутренней энергии и на совершение системой работы над внешними силами.

**Второе начало термодинамики:** Невозможен процесс, при котором теплота переходила бы самопроизвольно от тел более холодных к телам более нагретым (формулировка Р. Клаузиуса).

Невозможно построить периодически действующую машину, вся деятельность которой сводилась бы к совершению механической работы и соответствующему охлаждению теплового резервуара — формулировка У. Кельвина (Томсона).

### Энтропия

Существует функция состояния системы — ее энтропия  $S$ , приращение которой  $\Delta S$  при обратимом сообщении теплоты равно:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

(Это выражение является общей формулировкой второго начала термодинамики.)

### КПД тепловой машины

Коэффициентом полезного действия (КПД) теплового двигателя называется отношение энергии, использованной для выполнения полезной работы двигателем, ко всей энергии, полученной при сгорании топлива.

$$\eta = \frac{A_{\text{полезн}}}{Q_{\text{затр}}}$$

$A_{\text{полезн}}$  — полезная работа;

$Q_{\text{затр}}$  — энергия, полученная при сгорании топлива.

Так как  $A_{\text{полезн}} = |Q_1| - |Q_2|$ , а  $A_{\text{затр}} = Q_1$ , то формула расчета КПД может быть записана так:

$$\eta = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|}$$

Для идеального теплового двигателя (рабочее тело — идеальный газ):

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

$T_1$  — температура нагревателя;

$T_2$  — температура холодильника.

### Теорема Карно

Коэффициент полезного действия всякой тепловой машины не может превосходить коэффициент полезного действия идеальной машины, работающей по циклу Карно с теми же самыми температурами нагревателя и холодильника.

$$\eta \leq \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

### Адиабатный процесс

Процесс, при котором система не получает тепло извне и не отдает его, называется *адиабатным процессом* (от греческого слова *adiabatos* — *непереходимый*).

### Уравнение адиабаты (уравнение Пуассона)

а) В переменных  $p, V$ :

$\gamma$  — показатель адиабаты:  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ .

$$p \cdot V^\gamma = \text{const}$$

б) В переменных  $T, V$ :

$$T \cdot V^{\gamma-1} = \text{const}$$

в) В переменных  $T, p$ :

$$T^\gamma \cdot p^{1-\gamma} = \text{const}$$

**Уравнение теплового баланса**

В системе, состоящей из некоторого числа тел, не получающей тепло извне ( $Q = 0$ ) и не совершающей работы против внешних сил ( $A = 0$ ), уравнение первого начала термодинамики имеет вид:

$$\Delta U = 0.$$

В такой адиабатной замкнутой системе не может протекать иных процессов, кроме теплообмена. В процессе теплообмена внутренняя энергия одних тел увеличивается, других — уменьшается. Мерой этих изменений является количество теплоты  $Q$ .

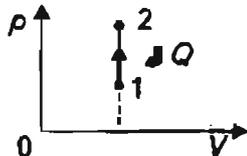
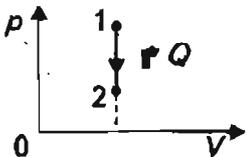
полученного или отданного телами. Так как  $\Delta U = 0$ , то сумма количеств теплоты, полученных и отданных телами при теплообмене, равна нулю. Поэтому первый закон термодинамики записывается в виде так называемого уравнения теплового баланса:

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0$$

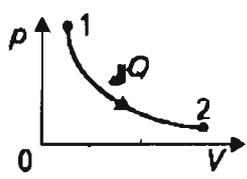
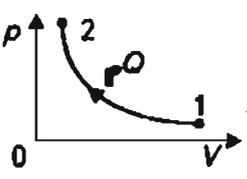
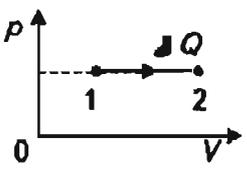
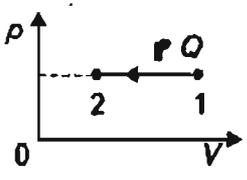
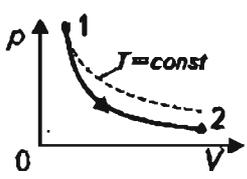
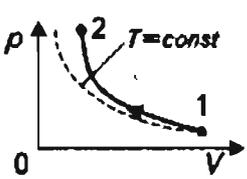
$Q > 0$  — полученные телами,

$Q < 0$  — отданные телами.

**ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРВОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ К ТЕПЛОВЫМ ПРОЦЕССАМ**

Название процесса	График	Запись закона	Изменение внутренней энергии	Физический смысл записи первого закона термодинамики
Изохорный $V = const$	 <p>нагревание <math>Q &gt; 0, A = 0</math></p>	$\Delta U = Q$	$\Delta U > 0$	Внутренняя энергия газа увеличивается за счет подводимого тепла
	 <p>охлаждение <math>Q &lt; 0, A = 0</math></p>	$\Delta U = -Q$	$\Delta U < 0$	Внутренняя энергия газа уменьшается за счет того, что газ отдает тепло окружающей среде

**ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРВОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ К ТЕПЛОВЫМ ПРОЦЕССАМ (продолжение)**

Название процесса	График	Запись закона	Изменение внутренней энергии	Физический смысл записи первого закона термодинамики
Изотермический $T = const$	 <p>расширение <math>A_r &gt; 0, Q &gt; 0</math></p>	$Q = A_r$	$\Delta U = 0$	Все переданное газу тепло идет на совершение им же работы
	 <p>сжатие <math>A_r &lt; 0, Q &lt; 0</math></p>	$A_{вн.с} = -Q$	$\Delta U = 0$	При совершении работы внешними силами газ отдает тепло окружающей среде
Изобарный $p = const$	 <p>нагревание (расширение) <math>A_r &gt; 0, Q &gt; 0</math></p>	$Q = \Delta U + A_r$	$\Delta U > 0$	Подводимое к газу тепло идет на увеличение его внутренней энергии и на совершение газом работы
	 <p>охлаждение (сжатие) <math>A_r &lt; 0, Q &lt; 0</math></p>	$\Delta U = -A_r - Q$	$\Delta U < 0$	Внутренняя энергия уменьшается за счет того, что над газом совершается работа и газ отдает тепло окружающей среде
Адиабатный $Q = 0$	 <p>расширение <math>A_r &gt; 0</math></p>	$\Delta U = -A_r$	$\Delta U < 0$	Внутренняя энергия газа уменьшается за счет того, что сам газ совершает работу. Газ охлаждается
	 <p>сжатие <math>A_r &lt; 0</math></p>	$\Delta U = A_{вн.с}$	$\Delta U > 0$	Работа внешних сил идет на увеличение внутренней энергии газа

*Самостоятельные  
работы*

### Самостоятельная работа 1.1

(выполняется в классе)

1. Можно ли определить внутреннюю энергию 1 моля кислорода, используя формулу для расчета внутренней энергии одноатомного идеального газа? Ответ обоснуйте.
2. В баллоне находится 5 кг аргона при температуре 300 К. Чему равна внутренняя энергия газа?
3. Средняя квадратичная скорость молекул гелия равна  $400 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Рассчитайте внутреннюю энергию 1 моля газа.
4. Одноатомный идеальный газ, находящийся при  $0^\circ\text{C}$ , нагрели на  $27^\circ\text{C}$ . На сколько процентов возросла его внутренняя энергия?
5. Какую работу совершил воздух массой 2 кг при его изобарном нагревании на 10 К?

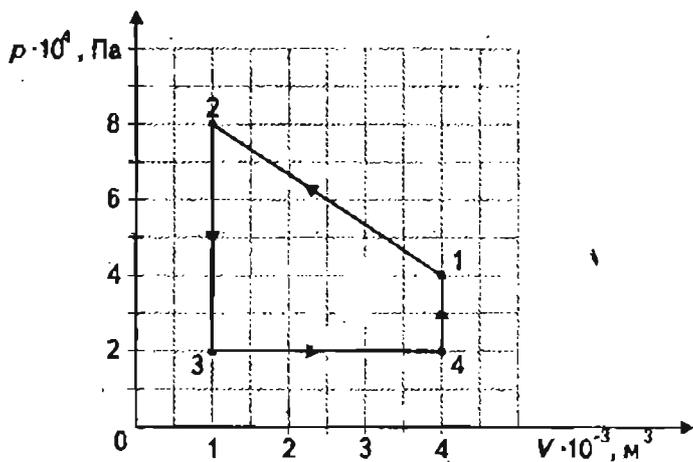


Рис. 61

6. Какую работу совершает идеальный газ за один цикл, изображенный на рис. 61?
7. Идеальный газ переводится из состояния 1 в состояние 3 тремя способами (рис. 62):
  - 1 — 2 — 3;
  - 1 — 4 — 3;
  - 1 — 5 — 3.

Используя график, определите:

а) Каким состояниям газа соответствуют наибольшая температура; наименьшая температура; одинаковые температуры?

- б) В каком случае совершается меньшая работа? Чему она равна?

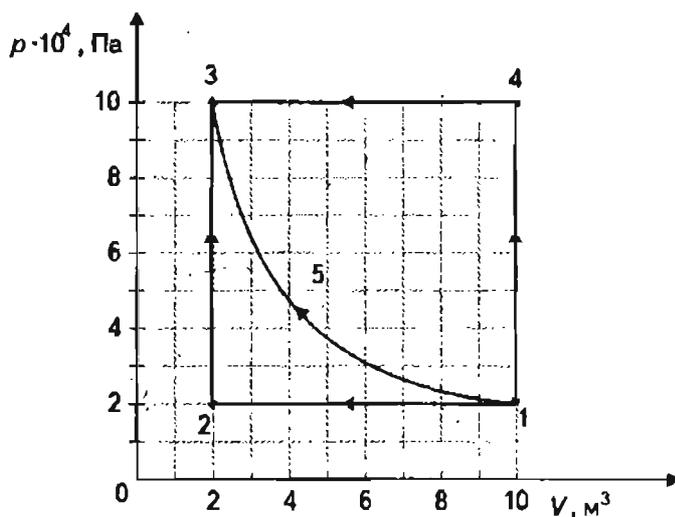


Рис. 62

8. Рассчитайте внутреннюю энергию смеси газа, состоящей из  $m_1 = 20$  г гелия и  $m_2 = 10$  г неона при температуре  $T = 300$  К.

### Самостоятельная работа 1.2

(выполняется дома)

1. Внутренняя энергия идеального одноатомного газа, находящегося при температуре  $27^\circ\text{C}$ , равна 15 кДж. Рассчитайте количество молей в данном газе.
2. Газ при постоянном давлении  $3,0 \cdot 10^6$  Па сжали на  $2,0$  м<sup>3</sup>. Рассчитайте работу внешних сил в этом процессе.
3. Какую работу совершил неон массой 3 кг при изобарном нагревании на 15 К?
4. Водород и кислород равной массы, взятые при одинаковых давлениях, изобарно охлаждаются на 10 К. Одинаковая ли работа совершается при этом? Почему?
5. Начальное состояние газа характеризуется параметрами  $p_1$  и  $V_1$  (см. рис. 63). При каком расширении, изотермическом или изобарном до  $V_2$ , газ совершит большую работу?

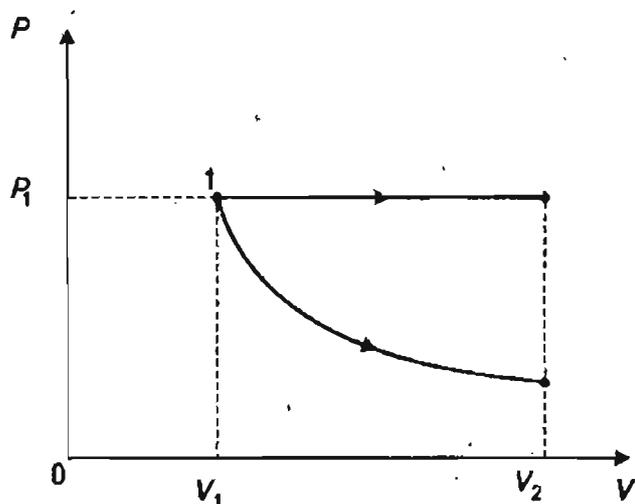


Рис. 63

6. Один моль газа переводится из состояния 1 в состояние 3 двумя способами (рис. 64):

- 1 – 2 – 3;
- 1 – 4 – 3.

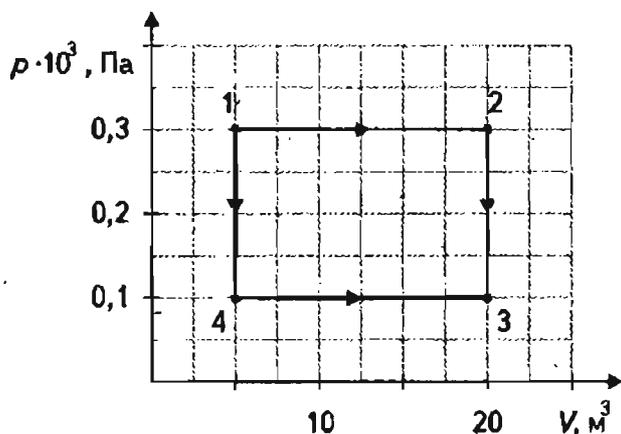


Рис. 64

Используя график, определите:

- а) В каком из этих случаев совершается большая работа? Ответ обоснуйте.
- б) Во сколько раз отличаются значения работ?

**Самостоятельная работа 2.1**

(выполняется в классе)

1. Газ находится в сосуде под давлением  $2,5 \cdot 10^4$  Па. При сообщении газу  $6,0 \cdot 10^4$  Дж теплоты он изобарно расширился на  $2,0$  м<sup>3</sup>. На сколько изменилась внутренняя энергия газа? Как изменилась температура газа?

- 2. В закрытом баллоне находится газ. При охлаждении его внутренняя энергия уменьшилась на 525 Дж. Совершает ли газ работу? Какое количество теплоты отдал газ?
- 3. При быстром сжатии газа в цилиндре его температура повышается. Изменяется ли при этом внутренняя энергия газа? Напишите уравнение первого закона термодинамики для этого случая. Где нашло применение это явление в технике?
- 4. На рис. 65 показаны процессы изменения состояния идеального газа.

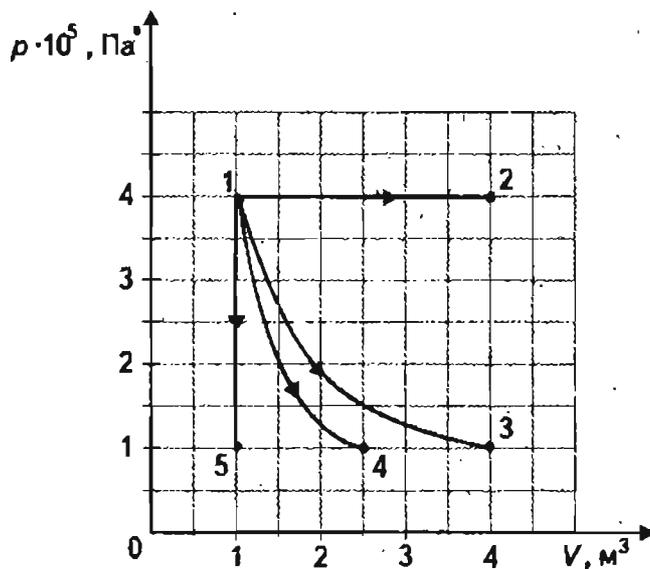


Рис. 65

Используя рисунок, выполните задания и ответьте на вопросы.

- 1) Назовите процессы.
- 2) В каком из них совершается меньшая работа? Ответ обоснуйте.
- 3) Подсчитайте работу при изобарном процессе.
- 4) В процессе изобарного расширения газу передано  $6 \cdot 10^6$  Дж теплоты. Рассчитайте изменение внутренней энергии газа. Что произошло с газом: нагрелся он или охладился?
- 5. Идеальный газ переводится из состояния 1 в состояние 3 различными способами (рис. 66):  
1 – 2 – 3;  
1 – 4 – 3.

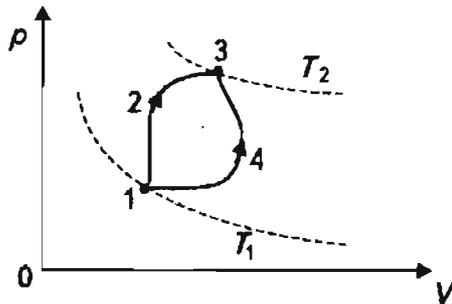


Рис. 66

Сравните:

- работу газа в указанных случаях;
  - изменение внутренней энергии;
  - количество теплоты, переданное газу.
6. Один моль одноатомного идеального газа находится в закрытом баллоне при температуре  $27^\circ\text{C}$ . Какое количество теплоты необходимо сообщить газу, чтобы повысить его давление в три раза?
7. С одним молем идеального одноатомного газа совершают процесс  $1-2-3-4$ , представленный на графике (рис. 67). На участке  $3-4$  к газу подводят  $2740$  Дж теплоты. Найдите отношение работы, совершенной газом в ходе всего процесса, к полному количеству теплоты за весь процесс  $1-2-3-4$ .  $T_0 = 100$  К.

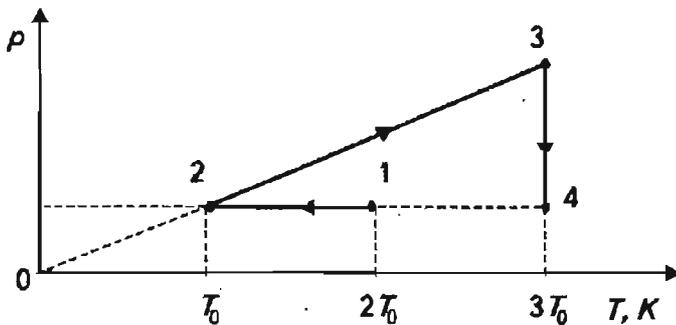


Рис. 67

### Самостоятельная работа 2.2

(выполняется дома)

- Газ находится в сосуде под давлением  $50$  МПа. При сообщении газу  $60$  МДж теплоты он изобарно расширился на  $0,5$  м<sup>3</sup>. На сколько изменилась внутренняя энергия газа? Как изменилась температура газа?

- При изохорном охлаждении газ отдал  $4 \cdot 10^7$  Дж теплоты. Рассчитайте изменение внутренней энергии газа.
- На рис. 68 изображен процесс изменения состояния идеального газа.

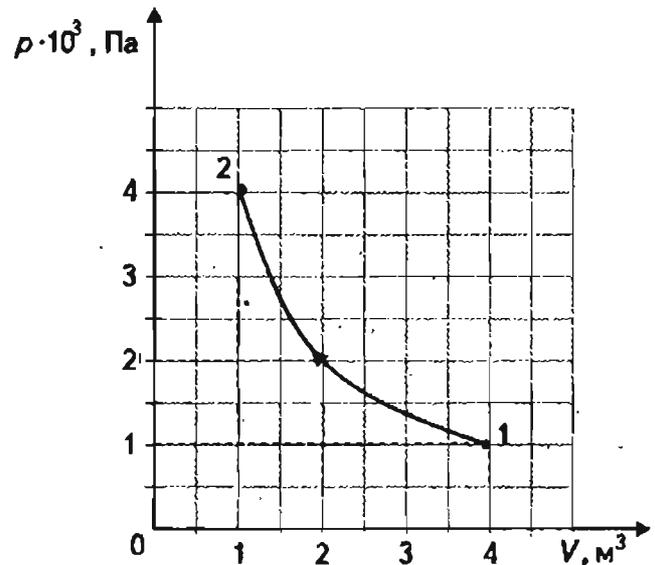


Рис. 68

Используя рисунок, выполните задания.

- Назовите процесс. Ответ обоснуйте.
- Определите работу, совершенную внешними силами, если в этом процессе газ отдал  $6 \cdot 10^3$  Дж теплоты.
- В процессе адиабатного сжатия над газом совершается работа, равная  $3$  МДж. Рассчитайте изменение внутренней энергии газа. Как изменилась температура газа?
- В процессе изобарного расширения газу передано  $6$  МДж теплоты. При этом газ совершил работу, равную  $1,2$  МДж. Изменилась ли внутренняя энергия газа? Нагрелся газ или охладился?
- Один моль одноатомного идеального газа совершает процесс  $1-2$ , изображенный на рис. 69. Рассчитайте работу газа и изменение его внутренней энергии.
- Некоторое количество аргона находится в закрытом сосуде объемом  $10$  л под давлением  $50$  кПа. Во сколько раз возрастет давление газа, если ему сообщить  $1500$  Дж теплоты?

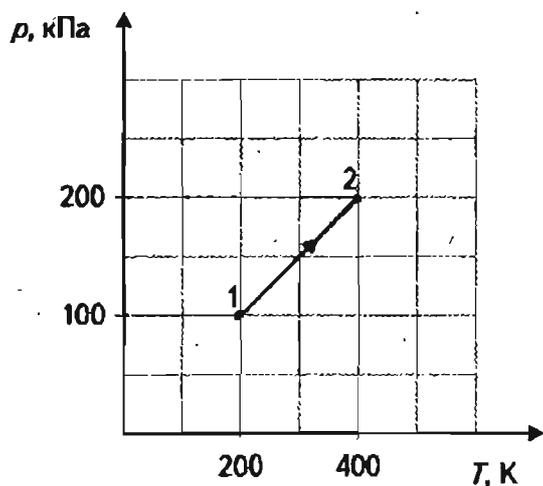


Рис. 69

**Самостоятельная работа 3.1**

(выполняется в классе)

1. Горячий пар поступает в турбину при температуре  $500^\circ\text{C}$ , а выходит при температуре  $30^\circ\text{C}$ . Считая паровую машину идеальной, вычислите ее КПД.

2. КПД идеального теплового двигателя равен 30%. Газ получил от нагревателя 10 кДж теплоты. Рассчитайте температуру нагревателя, если температура холодильника  $20^\circ\text{C}$ . Какое количество теплоты отдано холодильнику?

3. Температура нагревателя идеальной тепловой машины  $207^\circ\text{C}$ , а холодильника  $17^\circ\text{C}$ . Ежесекундно машина получает от нагревателя  $5 \cdot 10^4$  Дж теплоты. Рассчитайте КПД тепловой машины, количество теплоты, отдаваемое каждую секунду холодильнику.

В цилиндре дизельного двигателя температура воздуха равна  $40^\circ\text{C}$ , а давление до сжатия его —  $8 \cdot 10^4$  Па. Рассчитайте температуру сжатого воздуха, если в конце сжатия давление внутри цилиндра возросло до  $35 \cdot 10^5$  Па, а первоначальный объем уменьшился в 15 раз (степень сжатия).

(Уровень В). На рис. 70 изображены два цикла: 1 — 2 — 3 — 1 и 1 — 3 — 4 — 1. Оба цикла проведены с одним молем идеального одноатомного газа. У какого из циклов КПД больше и во сколько раз?

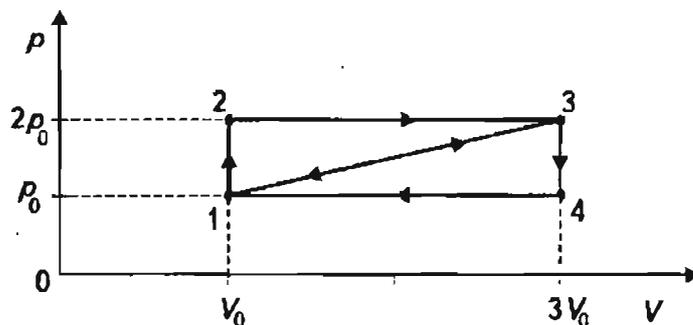


Рис. 70

6. В цилиндр двигателя внутреннего сгорания всасывается атмосферный воздух при температуре  $17^\circ\text{C}$ , а затем сжимается до давления  $40 \cdot 10^5$  Па. Рассчитайте степень сжатия воздуха в цилиндре ДВС, если температура сжатого воздуха равна  $527^\circ\text{C}$ . Первоначальное давление внутри цилиндра равно  $10^5$  Па.

7. Возможно ли, используя в качестве нагревателя воду океана с температурой  $20^\circ\text{C}$ , а в качестве холодильника — ледяной айсберг, построить тепловую машину с КПД 6%.

**Самостоятельная работа 3.2**

(выполняется дома)

1. Тепловой двигатель получает от нагревателя 0,4 МДж теплоты и отдает холодильнику 0,1 МДж. Чему равен КПД такого двигателя?

2. Температура нагревателя идеального теплового двигателя равна 425 К, а холодильника 300 К. Двигатель получает от нагревателя  $4 \cdot 10^4$  Дж теплоты. Рассчитайте работу, совершенную рабочим телом двигателя.

3. КПД идеального теплового двигателя равен 35%. Газ получил от нагревателя 70 кДж теплоты. Какое количество теплоты отдано холодильнику?

4. КПД идеального теплового двигателя равен 45%. Рассчитайте температуру нагревателя, если температура холодильника  $5^\circ\text{C}$ .

**Самостоятельная работа 4**

(уровень Б, выполняется в классе и дома)

1. В медном сосуде массой 2 кг нагревается до расплавления 0,8 кг олова от  $22^\circ\text{C}$  до  $232^\circ\text{C}$ . Какое количество теплоты потребуется для этого, если

считать начальную и конечную температуры сосуда и олова одинаковыми?

- С какой высоты должен был бы падать град с температурой  $0^\circ\text{C}$ , чтобы градинки при ударе о землю расплавились? Сопротивление воздуха не учитывать.
- Кусок свинца ударяется о препятствие со скоростью  $350 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Какая часть свинца расплавится, если все тепло, выделяемое при ударе, поглощается свинцом? Температура свинца перед ударом  $27^\circ\text{C}$ .
- Нагретая железная болванка массой  $3,3 \text{ кг}$  ставится на поверхность льда, имеющего температуру  $0^\circ\text{C}$ . После охлаждения болванки до  $0^\circ\text{C}$  под ней расплавилось  $460 \text{ г}$  льда. Какова температура нагретой болванки? Рассеивание тепла в окружающую среду не учитывать.
- В сосуд, содержащий  $0,6 \text{ кг}$  воды при температуре  $10^\circ\text{C}$ , опускают  $0,8 \text{ кг}$  льда, взятого при  $-20^\circ\text{C}$ . Пренебрегая теплообменом с окружающей средой и теплоемкостью сосуда, определите температуру и состав содержимого в сосуде.
- В ведре находится смесь воды со льдом массой  $10 \text{ кг}$ . Ведро внесли в комнату и сразу же стали измерять температуру смеси. Получившаяся зависимость температуры смеси от времени изображена на рис. 71. Определите массу льда в ведре, когда его внесли в комнату. Теплоемкостью ведра пренебречь.

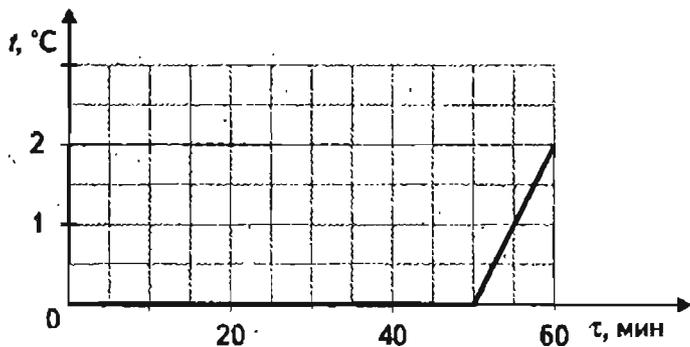


Рис. 71

### Самостоятельная работа 5

(уровень Б, выполняется в классе и дома)

- Некоторое количество гелия расширяется: сначала — адиабатно, а затем — изобарно. Конеч-

ная температура газа равна начальной, при адиабатном расширении газ совершил работу  $3 \text{ кДж}$ . Постройте примерный график процесса в системе координат  $p - V$  и определите работу газа при избранном процессе.

- Один моль идеального газа находится в цилиндре под поршнем при температуре  $T_1$ . Газ нагревают при постоянном давлении до температуры  $T_3$ . После этого газ охлаждают при постоянном объеме и при постоянном давлении так, что его объем падает до первоначального значения (рис. 72). Рассчитайте работу, совершенную газом за цикл, если известно, что точки 2 и 4 лежат на одной изотерме.

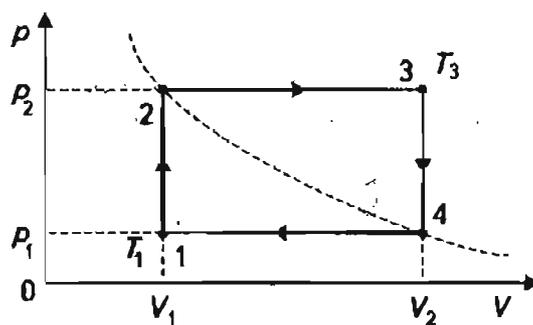


Рис. 72

- Над одним молем идеального газа совершается цикл, изображенный на рис. 73. Какую работу совершил газ во время этого процесса?  $\alpha$  — постоянная величина.

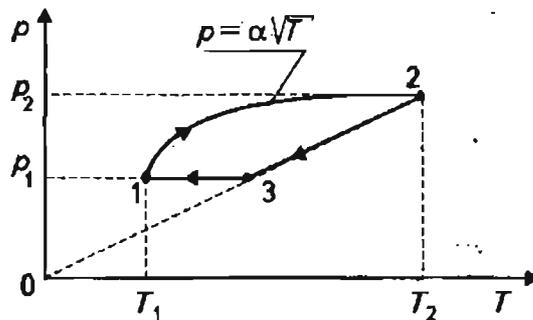


Рис. 73

- На рис. 74 приведен циклический процесс в системе координат  $V - T$ . Изобразите данный процесс в системе координат  $p - V$ . Рассчитайте КПД цикла. Рабочее тело — идеальный одноатомный газ.

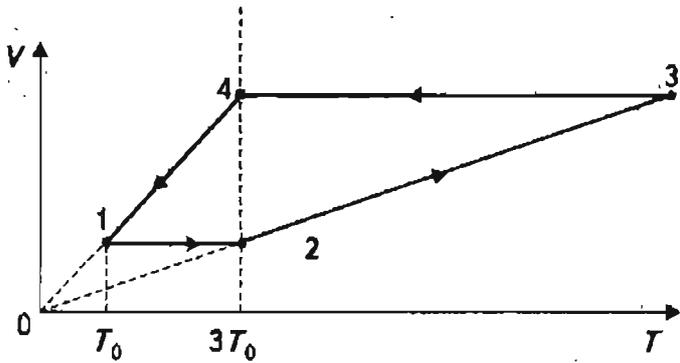


Рис. 74

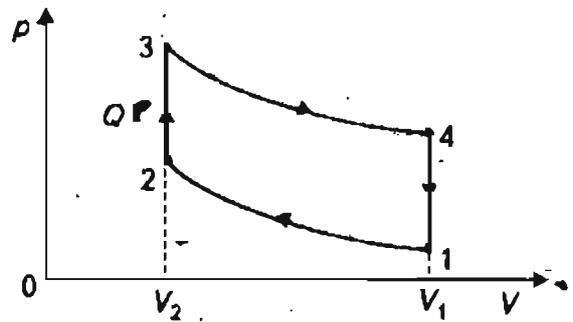


Рис. 76

5. В цилиндрическом сосуде под поршнем находится 1 моль идеального одноатомного газа. Масса поршня  $m_1$ , площадь сечения поршня  $S$ . Какое количество теплоты надо подводить к газу в единицу времени, чтобы поршень двигался равномерно вверх со скоростью  $v$ ? Атмосферное давление  $p_0$ . Трением между поршнем и стенками сосуда пренебречь.

6. Рассчитайте работу, совершенную 1 молем идеального газа в цикле, состоящем из двух участков линейной зависимости давления от объема и изохоры (рис. 75). Точки 2 и 3 лежат на изотерме, прямая 3-1 проходит через начало координат. Заданы температуры  $T_1$  и  $T_2 = T_3$ .

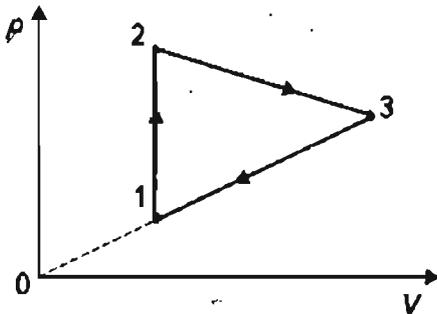


Рис. 75

7. На рис. 76 изображен идеализированный цикл бензинового двигателя внутреннего сгорания. Участок 1-2 соответствует адиабатному сжатию горючей смеси; участок 2-3 — изохорному сгоранию топлива, когда рабочее тело получает количество теплоты  $Q$ ; участок 3-4 соответствует адиабатному расширению рабочего тела; участок 4-1 — изохорному выпуску отработанных газов. Выразите КПД двигателя через степень сжатия газа  $\chi = \frac{V_2}{V_1}$ .

8. Идеальный газ перевели из состояния с давлением  $p_1 = 150$  кПа и объемом  $V_1 = 20,5$  л в состояние с давлением  $p_2 = 400$  кПа и объемом  $V_2 = 4,5$  л. Рассчитайте максимальную температуру газа в этом процессе, если известно, что график изменения состояния газа в координатах  $p - V$  (рис. 77) представляет собой прямую линию. Количество вещества  $\nu = 0,75$  моль.

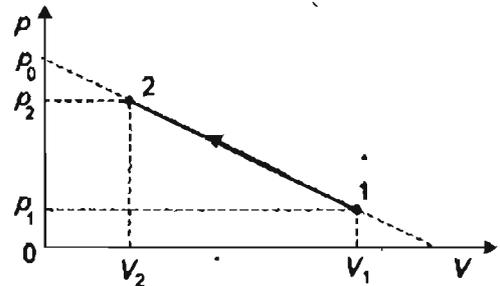


Рис. 77

9. Нижний конец вертикальной узкой трубки длиной  $2L$  запаян, а верхний открыт в атмосферу. В нижней половине трубки (рис. 78) находится газ при температуре  $T_0$ , а верхняя половина трубки заполнена ртутью. Трубку начинают медленно нагревать. До какой минимальной температуры нужно нагреть газ в трубке, чтобы он вытеснил всю ртуть? Внешнее давление  $p_0$ , измеренное в мм рт. ст., равно  $L$ .

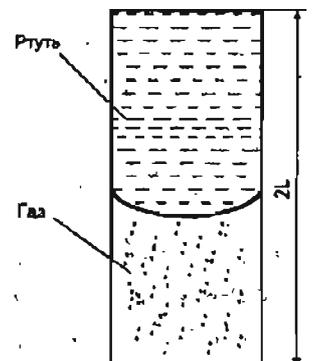


Рис. 78

Контрольные  
работы

## Контрольная работа №1

(уровень А, рассчитана на 40 минут)

## Вариант 1

1. В баллоне находится 2 кг неона при температуре 300 К. Чему равна внутренняя энергия газа?
2. КПД идеального теплового двигателя равен 40 %. Газ получил от нагревателя 5 кДж теплоты. Какое количество теплоты отдано холодильнику?
3. При передаче идеальному газу  $2 \cdot 10^4$  Дж теплоты он совершил работу, равную  $0,5 \cdot 10^5$  Дж. На сколько изменилась внутренняя энергия газа? Что произошло с газом: охлаждение или нагревание?
4. Газ переводится из состояния 1 в состояние 3 двумя различными способами (рис. 79):

1 – 2 – 3;

1 – 4 – 3.

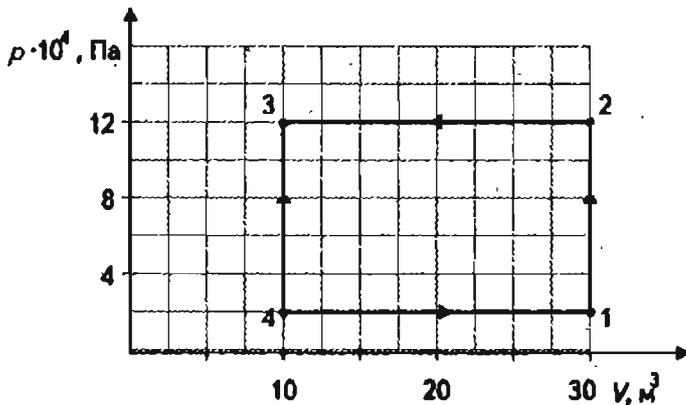


Рис. 79

В каком из этих случаев совершается большая работа? Какому состоянию соответствует наименьшая температура? Ответ обоснуйте.

## Вариант 2

1. Идеальный тепловой двигатель получает от нагревателя 0,6 МДж теплоты и отдает холодильнику 0,2 МДж теплоты. Чему равен КПД такого двигателя?
2. Рассчитайте внутреннюю энергию 1 моля гелия, находящегося при температуре 127 °С.
3. Какую работу совершил водород массой 3 кг при изобарном нагревании на 10 К?

4. На рис. 80 показан переход газа из состояния 1 в состояние 2. Назовите этот процесс и напишите уравнение первого закона термодинамики для этого процесса.

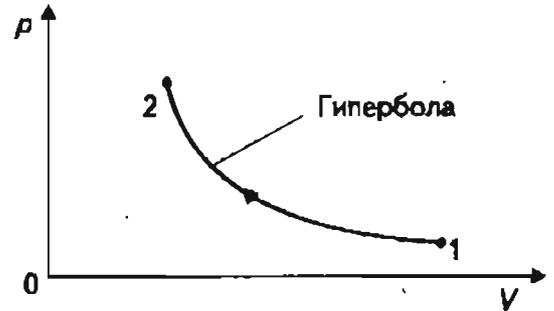


Рис. 80

## Контрольная работа №2

(уровень Б, рассчитана на 40 минут)

## Вариант 1

1. Сколько молекул гелия было в закрытом сосуде, если при нагревании на 20 °С внутренняя энергия газа увеличилась на 2 кДж?
2. В идеальной тепловой машине за счет каждого килоджоуля энергии, получаемой от нагревателя, совершается работа 300 Дж. Определите КПД машины и температуру нагревателя, если температура холодильника равна 7 °С.
3. Воздух при 0 °С и давлении 184 кПа занимает в цилиндре под поршнем объем 0,2 м<sup>3</sup>. Какова работа, совершенная в процессе изобарного расширения воздуха при нагревании его на 30 К? Каково поглощенное при этом количество теплоты?
4. Найдите КПД изображенного на рис. 81 цикла. Рабочее тело — идеальный одноатомный газ.

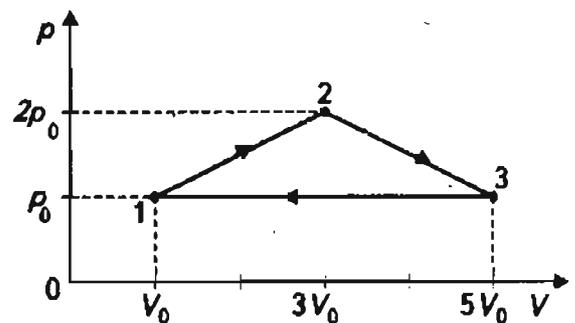


Рис. 81

**Вариант 2**

1. Рассчитайте работу расширения 20 л газа при его изобарном нагревании от 300 К до 393 К. Давление газа примите равным 80 кПа.
2. Температура нагревателя идеальной тепловой машины равна 117 °С, а холодильника 27 °С. Количество теплоты, получаемое машиной от нагревателя за 1 с равно 60 кДж. Вычислите КПД машины, а также количество теплоты, отдаваемое холодильнику в 1 с.
3. В цилиндре с площадью основания 0,25 м<sup>2</sup> под поршнем находится 0,022 кг водорода при 0 °С и давлении 250 кПа. Газ изобарно нагревают, сообщая ему 17,2 кДж теплоты. Рассчитайте совершенную при этом работу, а также изменение температуры в цилиндре.
4. Найдите КПД изображенного на рис. 82 цикла. Рабочее тело – идеальный одноатомный газ.

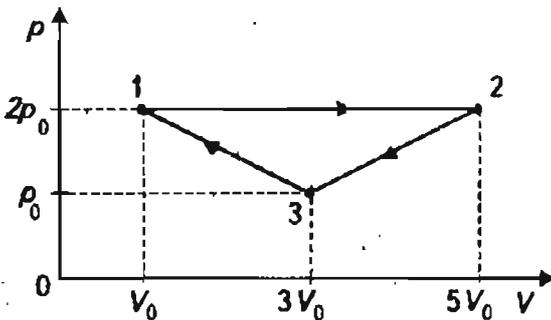


Рис. 82

*Школьный  
тест*

**Тест по разделу «Молекулярная физика, термодинамика»**  
(рассчитан на 40 мин)

**Вариант 1**

**Часть А**

1. В процессе диффузии...
  - А. молекулы (атомы) одного вещества проникают в межмолекулярное (межатомное) пространство другого вещества.
  - Б. молекулы (атомы) одного вещества проникают в молекулы (атомы) другого вещества.

- В. молекулы (атомы) вещества находятся в состоянии покоя.
  - Г. молекулы (атомы) вещества увеличиваются в размерах.
2. Какой вид теплопередачи сопровождается переносом вещества?
    - А. Только теплопроводность.
    - Б. Только конвекция.
    - В. Только излучение.
    - Г. Теплопроводность и излучение.
  3. Какой вид теплообмена в основном определяет передачу энергии от Солнца к Земле?
    - А. Конвекция.
    - Б. Излучение.
    - В. Теплопроводность.
    - Г. Теплопроводность и конвекция.
  4. На каком из графиков – А, Б, В или Г – можно найти участок, соответствующий кристаллизации ртути (см. рис. 83)?
  5. При увеличении температуры газа в 3 раза средняя кинетическая энергия молекул...
    - А. увеличивается в 3 раза.
    - Б. уменьшается в 3 раза.
    - В. не изменяется.
    - Г. увеличивается в 9 раз.
  6. Газ сжали, совершив работу, равную 3,6 кДж. В процессе сжатия в окружающую среду было передано 3 кДж теплоты. Изменение внутренней энергии газа равно...
    - А. 3,6 кДж.
    - Б. 0,6 Дж.
    - В. 3 кДж.
    - Г. 6,6 кДж.
  7. Нагретый кирпич массой 4 кг, охлаждаясь в воде на 2 °С, отдает ей 7040 Дж энергии. Чему равна удельная теплоемкость кирпича?
    - А.  $880 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$
    - Б.  $56320 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$

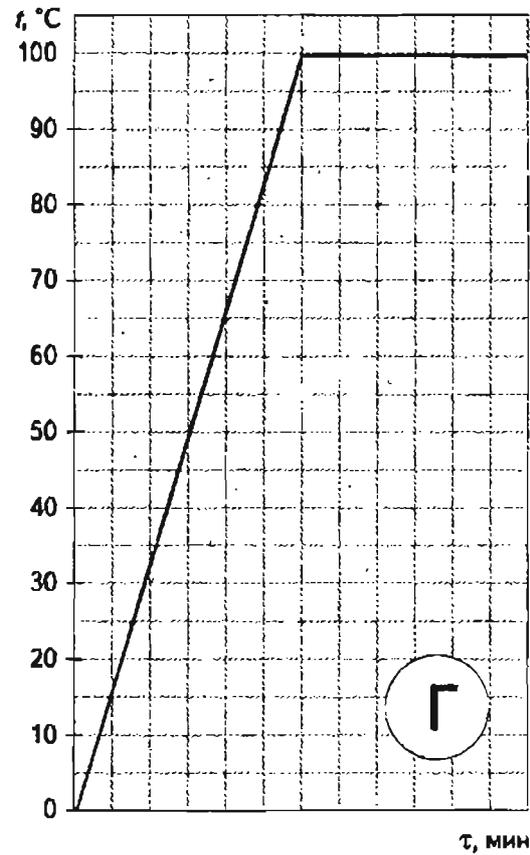
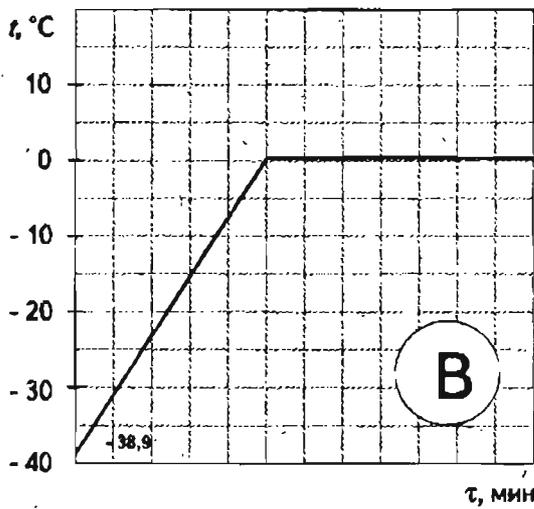
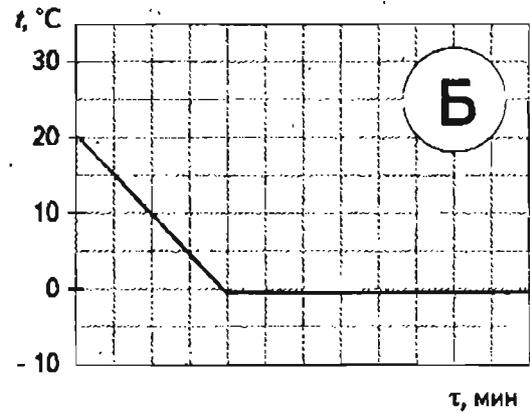
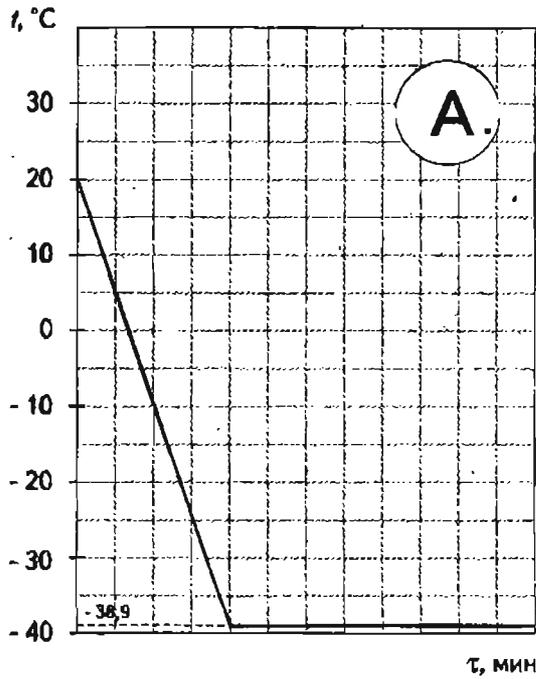


Рис. 83

- В.  $\approx 0,001 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}^\circ\text{C}}$ .  
 Г.  $3520 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}^\circ\text{C}}$ .
8. Какую массу спирта необходимо сжечь, чтобы выделилось  $5,4 \cdot 10^7$  Дж теплоты? Удельная теплота сгорания спирта  $2,7 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ .
- А.  $14,6 \cdot 10^{14}$  кг.

- Б. 0,5 кг.  
 В. 2 г.  
 Г. 2 кг.

9. Кристаллическое тело плавится при постоянной температуре. При этом подводимая к телу энергия преобразуется...

- А. в механическую энергию тела.

- Б. во внутреннюю энергию тела.
- В. в кинетическую энергию тела.

10. Какое количество теплоты потребуется для того, чтобы превратить в пар 300 г цинка при температуре кипения? Удельная теплота парообразования цинка равна  $1\,800\,000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ .

- А.  $5,7 \cdot 10^7$  Дж.
- Б.  $5,4 \cdot 10^5$  Дж.
- В. 6000 Дж.
- Г.  $6 \cdot 10^6$  Дж.

11. Как можно обеспечить изотермичность процессов в газе?

- А. Газ надо очень быстро нагреть.
- Б. Газ надо очень быстро охладить.
- В. Газ должен находиться в тепловом равновесии с окружающей средой.
- Г. Газ должен неограниченно расширяться.

12. Газ переходит из состояния 1 в состояние 2. Какой из графиков: А, Б, В или Г (рис. 84) — является графиком изохорного нагревания?

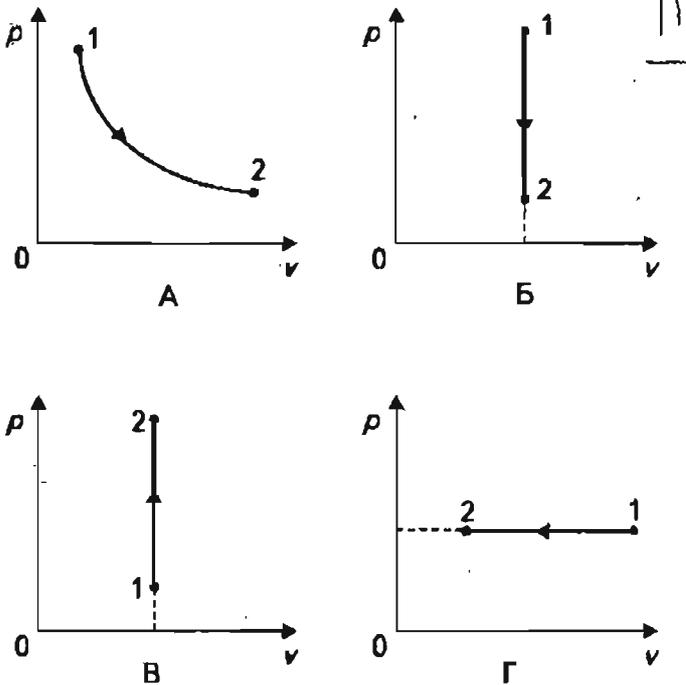


Рис. 84

13. Концентрация молекул газа при температуре 200 К и давлении 138 кПа равна...

- А.  $1,45 \text{ м}^{-3}$ .
- Б.  $690 \text{ м}^{-3}$ .
- В.  $2,76 \cdot 10^7 \text{ м}^{-3}$ .
- Г.  $5 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ .

14. Горячий пар поступает в турбину при температуре  $500^\circ\text{C}$ , а выходит при температуре  $30^\circ\text{C}$ . Считая паровую машину идеальной, оцените ее КПД.

- А. 160 %.
- Б. 106 %.
- В. 94 %.
- Г. 60 %.

15. Чему равна работа при переходе газа из состояния 1 в состояние 2 (рис. 85)?

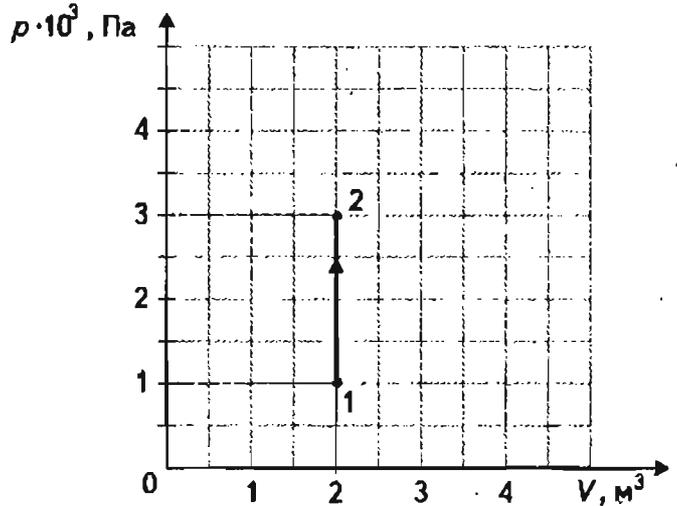


Рис. 85

- А. 3 кДж.
- Б. 6 кДж.
- В. 0.
- Г. 2 кДж.

**Часть Б**

16. На рис. 86 в системе координат  $p - V$  изображен график изотермического процесса идеального газа.

Какой из графиков, представленных на рис. 87: А, Б, В или Г — соответствует этому процессу в системе координат  $p - T$ ?

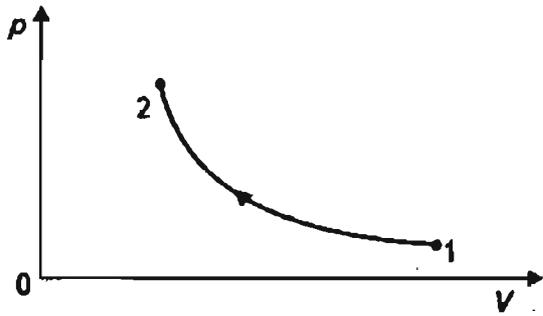


Рис. 86

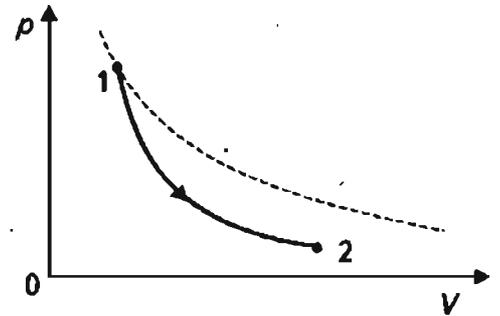


Рис. 88

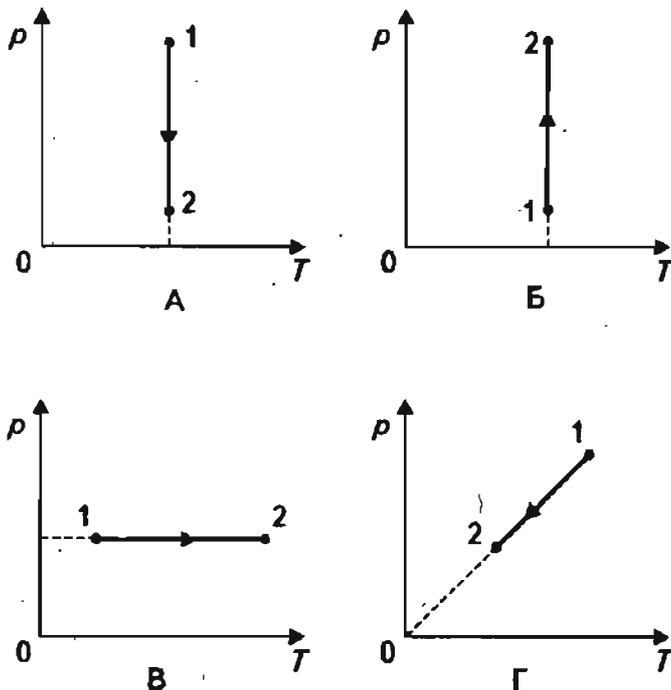


Рис. 87

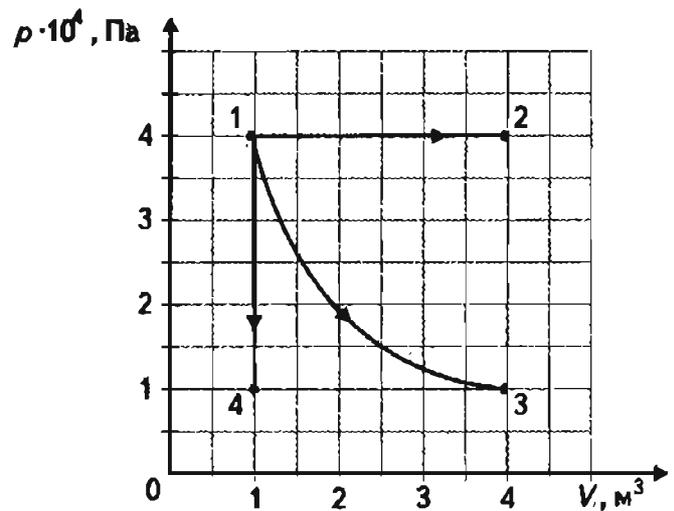


Рис. 89

- А. 1 и 2.  
 Б. 1 и 3.  
 В. 1 и 4.  
 Г. 2, 3 и 4.

17. Внутренняя энергия идеального газа при адиабатном процессе, график которого представлен на рис. 88,...

- А. не изменяется;  
 Б. увеличивается;  
 В. уменьшается;  
 Г. сначала увеличивается, затем уменьшается.

18. Идеальный газ определенной массы переводится из одного состояния в другое тремя способами (рис. 89): 1 — 2; 1 — 3 и 1 — 4.

Каким состояниям соответствуют одинаковые температуры?

19. Внутренние слои Солнца условно делят на три примерно одинаковые по протяженности части: зона ядерных реакций, лучистая зона, конвективная зона. В какой из зон происходит перенос вещества?

- А. В зоне ядерных реакций.  
 Б. В лучистой зоне.  
 В. В конвективной зоне.  
 Г. Во всех зонах.

20. На рис. 90 приведен график зависимости внутренней энергии некоторой массы одноатомного идеального газа от температуры. Используя график, определите количество молей в данном газе.

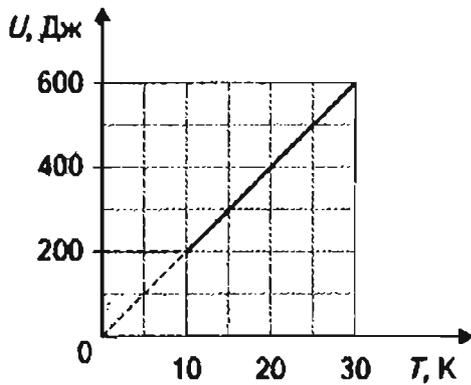


Рис. 90

- А. 10 моль.
- Б. 200 моль.
- В.  $\approx 0,5$  моль.
- Г.  $\approx 1,6$  моль.

**Вариант 2**

**Часть А**

1. Какие физические параметры должны быть одинаковыми у тел, находящихся в тепловом равновесии?

- А. Давление.
- Б. Концентрация.
- В. Температура.
- Г. Объем.

2. Железный брусок практически невозможно сжать. Это объясняется тем, что при сжатии частицы железа...

- А. начинают непрерывно, хаотически двигаться.
- Б. начинают сильнее притягиваться друг к другу.
- В. имеют одинаковую массу и одинаковые размеры.
- Г. начинают сильнее отталкиваться друг от друга.

3. Для обогрева помещений используются батареи центрального отопления. Обогреву комнаты преимущественно способствует...

- А. Теплопроводность.

- Б. Конвекция.
- В. Излучение.
- Г. Излучение и теплопроводность

4. В процессе плавления твердого тела средняя скорость движения молекул не увеличивается. Происходит ли при плавлении изменение внутренней энергии тела?

- А. Внутренняя энергия тела не изменяется.
- Б. Внутренняя энергия тела увеличивается.
- В. Внутренняя энергия тела уменьшается.
- Г. Внутренняя энергия тела иногда увеличивается, иногда уменьшается.

5. Два одинаковых твердых тела, имеющие различные температуры, привели в соприкосновение тремя способами так, как показано на рисунке 91. Какое из перечисленных ниже утверждений является верным?

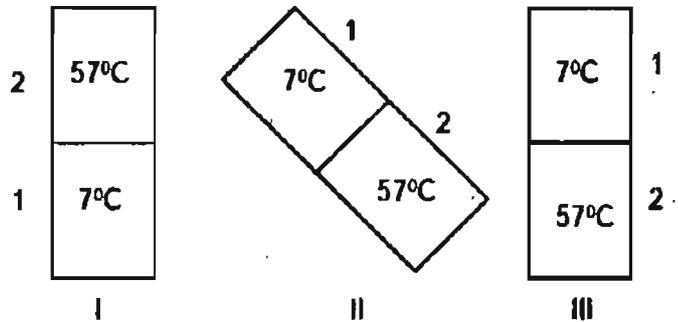


Рис. 91

- А. Теплопередача осуществляется только в положении I от тела 1 к телу 2.
- Б. Теплопередача осуществляется только в положении II от тела 2 к телу 1.
- В. Теплопередача осуществляется только в положении III от тела 1 к телу 2.
- Г. В любом положении тел теплопередача осуществляется от тела 2 к телу 1.

6. Плавление вещества происходит потому, что...

- А. частицы с любыми скоростями покидают твердое тело.
- Б. частицы уменьшаются в размерах.
- В. разрушается кристаллическая решетка.

- Г. уменьшается потенциальная энергия частиц твердого тела.
7. Чем обусловлено броуновское движение?
- А. Столкновением молекул жидкости (или газа) друг с другом.
- Б. Столкновением частиц, взвешенных в жидкости (или газе).
- В. Столкновением молекул жидкости (или газа) с частицами, взвешенными в ней (нем).
- Г. Ни одной из указанных причин.
8. Из холодильника вынули пакет с 200 г кефира и поставили на стол. Температура в холодильнике  $4^\circ\text{C}$ . Какое количество теплоты получит кефир при нагревании до комнатной температуры  $24^\circ\text{C}$ ? Удельная теплоемкость кефира равна  $3800 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}^\circ\text{C}}$ .
- А. 3040 Дж.
- Б. 15,2 МДж.
- В. 15,2 кДж.
- Г. 18 240 Дж.
9. Какое количество теплоты выделяется при полном сгорании 5 т антрацита? Удельная теплота сгорания антрацита равна  $3 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ .
- А.  $15 \cdot 10^7$  Дж.
- Б.  $15 \cdot 10^{10}$  Дж.
- В.  $6 \cdot 10^6$  Дж.
- Г.  $6 \cdot 10^3$  Дж.
10. На каком из графиков (рис. 92): А, Б, В или Г — можно найти участок, соответствующий кипению жидкости?
11. В процессе адиабатного сжатия над газом совершается работа, равная 30 МДж. При этом внутренняя энергия газа...
- А. становится равной нулю;
- Б. уменьшается на 30 МДж;
- В. увеличивается на 30 МДж;
- Г. может увеличиться или уменьшиться на 30 МДж.

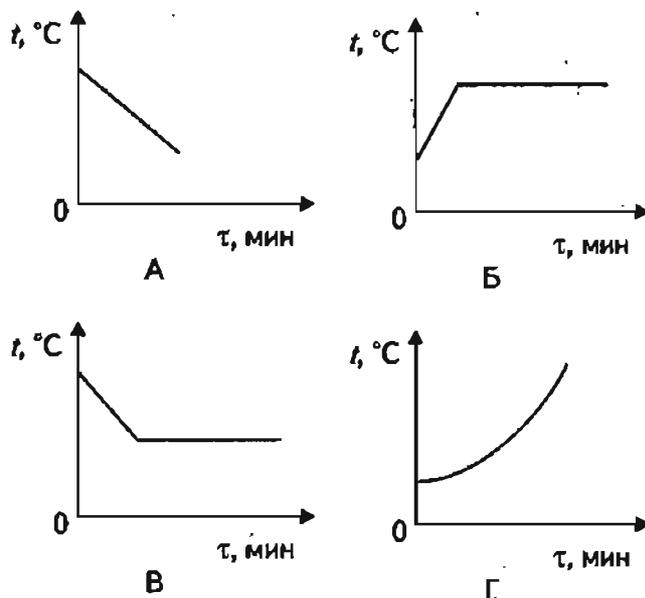


Рис. 92

12. Газ переходит из состояния 1 в состояние 2. Какой из графиков (рис. 93): А, Б, В или Г — является графиком изохорного нагревания?

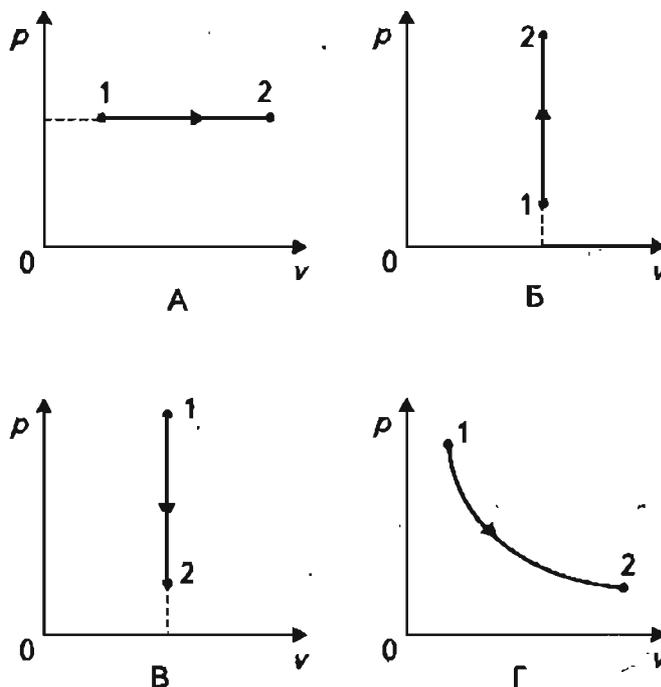


Рис. 93

13. Чему равна температура молекулярного азота в баллоне вместимостью  $8,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ? Масса газа 140 г, давление равно 3,5 МПа.

- А. 700 К.
- Б. 273 К.
- В. -8 К.
- Г. 70 К.

14. Изменяется ли внутренняя энергия газа при изотермическом расширении?

- А. Увеличивается.
- Б. Уменьшается.
- В. Не изменяется.
- Г. Внутренняя энергии может принимать любое значение.

15. Тепловая машина получает от нагревателя 0,4 МДж теплоты и отдает холодильнику 0,1 МДж теплоты. Оцените максимальное значение КПД тепловой машины.

- А. > 100 %.
- Б. 100 %.
- В. 80 %.
- Г. 75 %.

**Часть Б**

16. Как изменится средняя квадратичная скорость молекул азота, если температура газа увеличится в 4 раза?

- А. Увеличится в 4 раза.
- Б. Уменьшится в 2 раза.
- В. Увеличится в 2 раза.
- Г. Не изменится.

17. При изотермическом процессе давление некоторой массы газа уменьшилось в 3 раза. Изменилась ли концентрация газа в сосуде?

- А. Не изменилась.
- Б. Увеличилась в 3 раза.
- В. Уменьшилась в 3 раза.
- Г. Увеличилось в 9 раз.

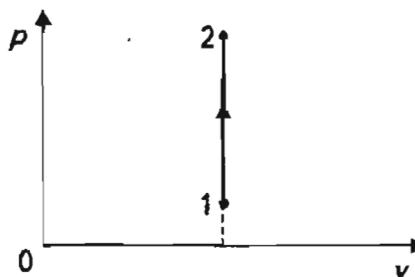


Рис. 94

18. Внутренняя энергия идеального газа в процессе, изображенном на рис. 94,...

- А. сначала растет, затем уменьшается.
- Б. увеличивается.
- В. уменьшается.
- Г. не изменяется.

19. Водород и гелий равной массы, взятые при одинаковых давлениях, нагревают на 30 К. Одинаковая ли работа совершается при этом?

- А. Работа, совершенная водородом, в 2 раза больше.
- Б. Работа, совершенная гелием, в 2 раза больше.
- В. Совершаются равные работы.
- Г. Работа, совершенная водородом, в 4 раза меньше.

20. Идеальный газ переводится из первого состояния во второе тремя способами (рис. 95):

- 1 - а - 2;
- 1 - б - 2;
- 1 - в - 2.

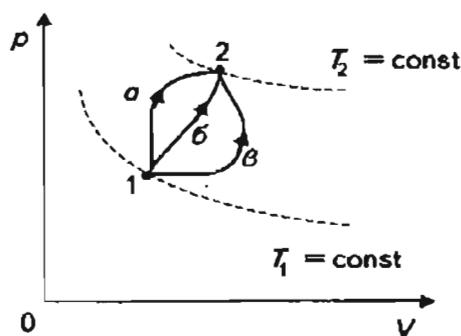


Рис. 95

Изменение внутренней энергии газа при переходе его из одного состояния в другое удовлетворяет соотношению...

А.  $\Delta U_{1a2} > \Delta U_{162} > \Delta U_{1b2}$ .

Б.  $\Delta U_{1a2} < \Delta U_{162} < \Delta U_{1b2}$ .

В.  $\Delta U_{1a2} = \Delta U_{162} = \Delta U_{1b2}$ .

Г.  $\Delta U_{1a2} = \Delta U_{162} = \Delta U_{1b2} = 0$ .

# *Электростатика и постоянный ток*

- ◆ Законы взаимодействия неподвижных зарядов
- ◆ Напряженность электрического поля
- ◆ Потенциал электрического поля
- ◆ Работа по разделению зарядов. ЭДС
- ◆ Конденсатор. Энергия электрического поля
- ◆ Электрический ток. Носители тока
- ◆ Напряжение, сопротивление, закон Ома для участка цепи
- ◆ Закон Ома для полной цепи
- ◆ Расчет сопротивлений, токов и напряжений
- ◆ Тепловое действие тока (закон Джоуля—Ленца)
- ◆ Магнитное поле
- ◆ Силы Ампера и Лоренца
- ◆ Применение электроприборов в быту и технике



### Изучив эту тему,

- ♦ вы узнаете о явлении электризации тел;
- ♦ поймете, как электрические свойства тел связаны с их строением;
- ♦ сможете применять законы Кулона, сохранения заряда и принцип суперпозиции для расчета силы взаимодействия точечных зарядов

### Основные понятия:

Электризация ♦ Электрический заряд ♦ Знак заряда  
 ♦ Точечный заряд ♦ Проводник и диэлектрик ♦ Элементарный заряд ♦ Электрон ♦ Ион ♦ Поляризация  
 ♦ Закон сохранения заряда ♦ Закон Кулона ♦ Принцип суперпозиции

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

**Электризация** — физическое явление, которое указывает на возникновение взаимодействия (притяжения или отталкивания) двух тел при приведении их в плотный контакт или при трении (стекло и кожа, плексиглас и шерсть, резина и шерсть). Обнаружено в Древней Греции при трении янтаря (по-гречески — *электрон*) о шерсть.

**Электрические силы** — силы, возникающие при электризации.

**Электрический заряд** (обозначается буквой  $q$  или  $Q$ ) — физическая величина, характеризующая свойство тел вступать в электрическое взаимодействие. Измеряется в кулонах (1 Кл). Единица изме-

рения названа в честь французского исследователя Шарля Кулона. В СИ определяется через свойства движущихся зарядов (см. тему «Электрический ток, носители тока в средах»). Заряд в 1 Кл накопить путем электризации на одном теле нельзя, так как он очень велик. Два тела с таким зарядом на расстоянии 1 м притягивались (или отталкивались) бы друг от друга с силой примерно  $10^{10}$  Н.

Заряд может распределяться («растекаться») по двум телам, если их привести в соприкосновение (например, по двум металлическим шарикам), и они отталкиваются друг от друга. Если два металлических шара одинакового размера, один из кото-

рых заряжен, привести в соприкосновение, то заряд распределится поровну между двумя шарами.

**Одноименные заряды** способствуют отталкиванию двух заряженных тел. **Разноименные заряды** способствуют притяжению двух заряженных тел (рис. 1).

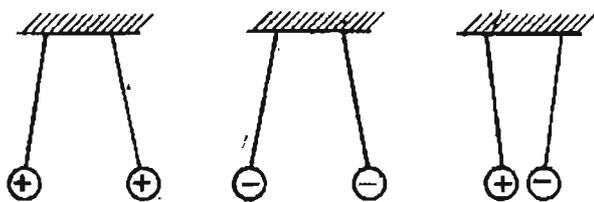


Рис. 1

**Положительный заряд** («+») — заряд, который приобретает стекло при трении о натуральный шелк или кожу.

**Отрицательный заряд** («-») — заряд, который приобретает янтарь, плексиглас (оргстекло) при трении о шерсть.

**Точечный заряд** — заряд, распределенный на теле, размеры которого значительно меньше, чем любые расстояния между взаимодействующими телами в данной задаче — удобная модель реальных заряженных тел.

**Электроскоп** — прибор, позволяющий измерять заряд, помещенный на центральный стержень электроскопа (рис. 2). Принцип действия прибора основан на отталкивании от стержня стрелки, приобретающей тот же заряд, что и стержень. По углу отклонения стрелки можно судить о заряде, сообщенном электроскопу.

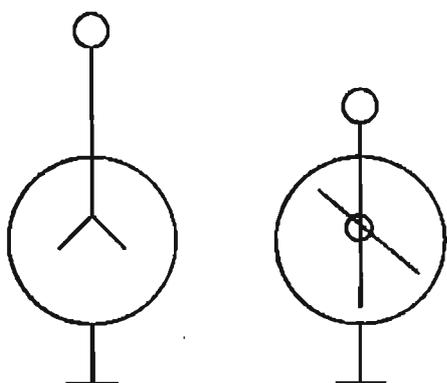


Рис. 2

**Проводник** — материал, вещество, по которому заряд может свободно перемещаться от заряженного

тела к незаряженному или от тела к телу, при разноименных зарядах на них (металлы, уголь, графит, специальные полимеры, растворы солей, кислот, щелочей, влажная земля, тело человека и т. д.).

**Изоляторы или диэлектрики** — вещества или материалы, по которым электрический заряд при обычных условиях не может перемещаться (газы, керосин, масла, чистая дистиллированная вода, резина, стекло, пластмассы, фарфор и т. д.).

**Элементарный заряд** ( $e$ ) — минимальная порция заряда, которая может переноситься от одного тела к другому.

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

**Электрон** — частица, входящая в состав всех атомов, из которых состоят вещества. При этом атом каждого химического элемента состоит из ядра, имеющего заряд  $+Ze$  ( $Z$  — номер элемента в периодической системе) и  $Z$  электронов, таким образом, атом электрически нейтрален. Электрон имеет массу  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг и является носителем элементарного заряда. Знак заряда электрона — отрицательный. По современным представлениям, именно свойствами электрона объясняются основные электрические свойства веществ.

В частности, электризация твердых тел — это перемещение электронов, входящих в состав атомов одного тела, с одного тела на другое. При этом на теле, приобретающем отрицательный заряд, образуется избыток электронов, а на положительно заряженном теле — недостаток электронов по сравнению с незаряженным состоянием тела.

**Проводимость твердых тел** — это способность электронов свободно перемещаться по всему объему тела. Таким свойством обладают, например, электроны в металлах.

**Поляризация** — смещение разноименных зарядов, входящих в состав электрически нейтрального тела, молекулы или атома, в противоположные стороны. Поляризация происходит обычно под действием внешнего заряда. В результате поляризации электронейтрального металлического шара, например, при поднесении к нему положительно заряженного тела, он приобретает способность притягиваться к поднесенному заряду (рис. 3). Это объясняется тем, что свободные электроны в металле перемещаются и приближаются к подне-

сенному положительному заряду. В результате на одной стороне шара образуется отрицательный «полюс», а на противоположной — положительный, отсюда название явления. Поскольку расстояние от поднесенного заряда до этих полюсов разное, то силы притяжения и отталкивания не компенсируются (см. закон Кулона), и нейтральный шар притягивается к поднесенному положительному заряду. Аналогичное притяжение возникает и при поднесении отрицательного заряда к металлическому телу.

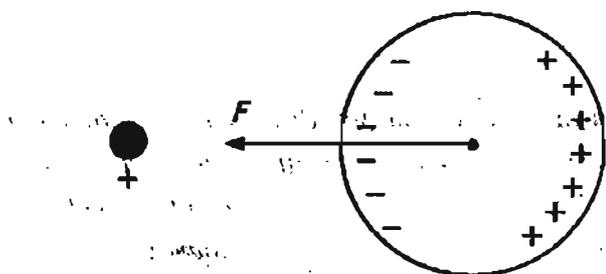


Рис. 3

Поляризацией молекул можно объяснить и притяжение мелких диэлектрических частиц (кусочков бумаги, например) к заряженному телу.

**Ион** — атом, потерявший один, два и т. д. электрона или имеющий избыток электронов, по сравнению с нормальным своим состоянием (рис. 4). Например  $\text{Na}^+$  — атом натрия, «потерявший» один электрон,  $\text{Na}^-$  — атом натрия, приобретший один избыточный электрон,  $\text{Fe}^{3+}$  — положительно заряженный ион железа, образовавшийся за счет потери, отдачи другому атому трех электронов.

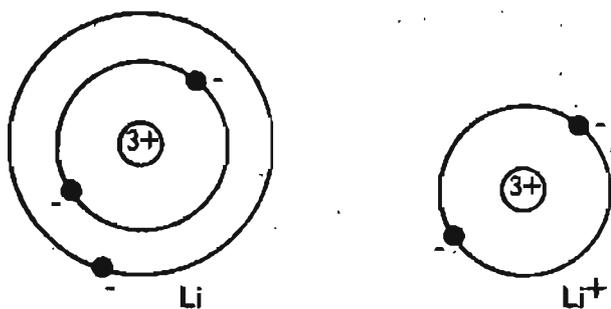


Рис. 4

**Электростатика** — наука, изучающая неподвижные заряды и их взаимодействие.

## Законы электростатики

Экспериментальное исследование заряженных тел в течение двух с лишним тысячелетий позволяет к настоящему времени сформулировать три закона, которым подчиняется поведение таких тел.

1. **Закон сохранения заряда.** В электрически замкнутой системе алгебраическая (то есть с учетом знаков) сумма зарядов не меняется.

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = q'_1 + q'_2 + \dots + q'_n, \text{ где}$$

$q_1$  и  $q'_1$  — заряды одного тела системы до и после взаимодействия его с другими телами системы.

**Электрически замкнутая система** — это несколько тел, которые могут обмениваться зарядами между собой, но к которым не поступают заряды извне и с которых не уходят заряды. Это идеализированная модель, которая может описывать реальную систему в течение некоторого времени и с некоторой точностью. Так, два заряженных шара, подвешенные на нитях из изолятора в воздухе — это электроизолированная в течение какого-то времени система, если заряды шаров велики по сравнению с зарядом электрона, например в миллиард раз. Однако о них ежесекундно ударяются миллиарды молекул воздуха, которые могут, отскакивая, иногда захватывать с собой избыточные электроны. Таким образом, через некоторое время шары потеряют свой заряд. Два атома, столкнувшиеся в вакууме — электроизолированная система, если при соударении от них не отлетел электрон.

2. **Закон Кулона.** Модуль силы  $F_{12}$  взаимодействия между точечными электрическими зарядами  $q_1$  и  $q_2$  пропорционален произведению абсолютных значений этих зарядов, и обратно пропорционален квадрату расстояния  $R_{12}$  между ними. Модуль силы  $F_{12}$  взаимодействия зарядов зависит от среды, в которой взаимодействуют заряды.

Для каждой среды существует коэффициент, который называется диэлектрической проницаемостью среды  $\epsilon$ . Диэлектрическая проницаемость среды показывает, во сколько раз сила взаимодействия двух зарядов в среде меньше, чем в вакууме.

Сила взаимодействия направлена по линии, соединяющей эти заряды.

$$F_{12} = \frac{k|q_1||q_2|}{\epsilon R_{12}^2}$$

Здесь  $k$  — коэффициент пропорциональности, позволяющий, измеряя заряды в кулонах, а расстояние в метрах, получить силу в ньютонах.

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

В учебниках можно встретить и другой вид коэффициента.

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}, \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$$

В таблицах мировых констант он называется **электрической постоянной** — не путать с  $\epsilon!$  Диэлектрическая проницаемость среды для вакуума  $\epsilon = 1$ , для воздуха  $\epsilon \approx 1$ , для керосина  $\epsilon \approx 2$  и т. д. (рис. 5).

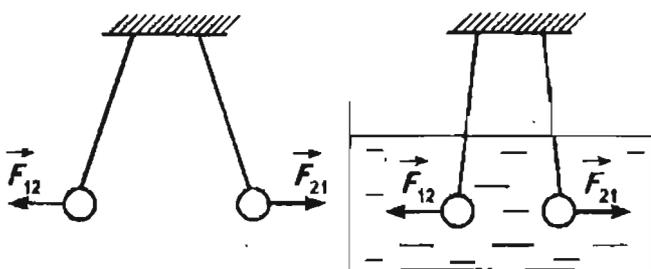


Рис. 5

Направление силы выбирают исходя из знака зарядов. Не следует забывать о третьем законе Ньютона в применении к электрическим силам и понимать, что, с какой силой второй заряд действует на первый, с такой же силой, но направленной противоположно, первый заряд действует на второй.

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

Закон Кулона верен только для точечных зарядов, т. е. для заряженных тел, которые в данной задаче можно считать точечными зарядами. Так, заряженный шарик и пластину на расстояниях, сравнимых с размерами шарика и пластины,

нельзя рассматривать как точечные заряды и применять для них закон Кулона (рис. 6).

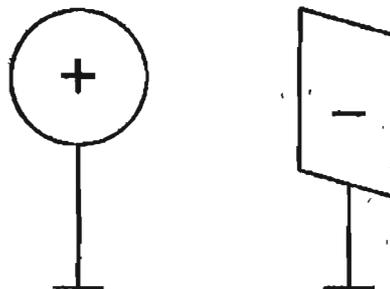


Рис. 6

3. **Принцип суперпозиции.** Результирующая сила  $\vec{R}$ , действующая на данный заряд  $q_1$  со стороны нескольких зарядов  $q_2 \dots q_n$ , равна геометрической сумме сил  $\vec{F}_{12}, \dots, \vec{F}_{1n}$ , действующих на данный заряд со стороны каждого из зарядов.

$$\vec{R} = \vec{F}_{12} + \dots + \vec{F}_{1n}$$

В философском смысле этот экспериментальный факт означает, что третий заряд никак не влияет на взаимодействие данной пары зарядов. В практическом смысле принцип суперпозиции дает правило для расчета силы, действующей на данный заряд со стороны, например, двух других зарядов. Необходимо по закону Кулона рассчитать силы, действующие на первый заряд со стороны второго и третьего, а затем найти результирующую силу (рис. 7) по правилам сложения векторов (правило параллелограмма или сложения проекций исходных векторов для нахождения проекций суммарного вектора на выбранные оси).

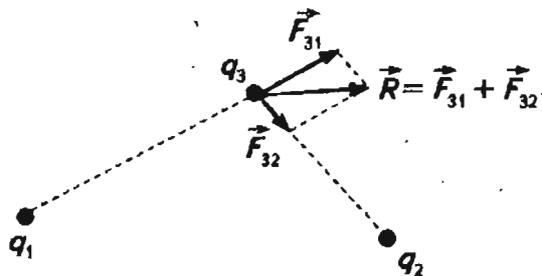
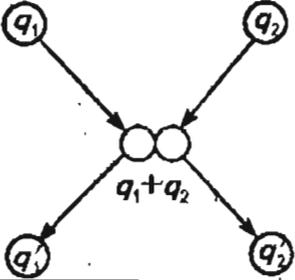
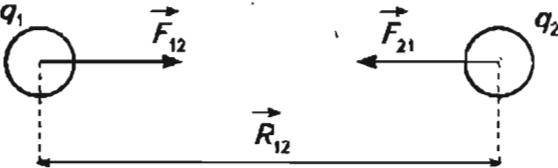


Рис. 7

Законы в виде формул	Обозначения величин, единицы измерения в СИ, справочные значения констант
<p>Закон сохранения заряда</p> $q_1 + q_2 + \dots + q_n = q'_1 + q'_2 + \dots + q'_n$ 	<p><math>q_n</math> — электрический заряд под номером <math>n</math>  Единица измерения заряда — 1 Кл (кулон)  Элементарный заряд <math>e = 1,6 \cdot 10^{-19}</math> Кл  Заряд протона <math>q_p = +1,6 \cdot 10^{-19}</math> Кл  Заряд <math>\alpha</math>-частицы <math>q_\alpha = +3,2 \cdot 10^{-19}</math> Кл</p>
<p>Закон Кулона</p> $F_{12} = F_{21} = \frac{ q_1  q_2 }{4\pi\epsilon_0\epsilon R_{12}^2} = k \frac{ q_1  q_2 }{\epsilon R_{12}^2}$ 	<p><math>F_{12}</math> — сила, с которой первый заряд действует на второй  Единица измерения силы — 1 Н (Ньютон)  <math>\epsilon</math> — диэлектрическая проницаемость среды — безразмерная величина.  Числовая константа <math>\pi \approx 3,14</math>  Электрическая постоянная <math>\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}</math></p> <p>Коэффициент пропорциональности в законе Кулона</p> $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Кл}^2}$

### *Экспериментальные задания*

#### 1. Изучение электризации тел (выполняется дома)

**Цель:** установление знака зарядов, образующихся при электризации тел трением.

**Оборудование и материалы:** держатель, нить, кусочек пенопласта, линейка из оргстекла, полиэтиленовый пакет, кусок резины, кусок бумаги; кусок шерстяной ткани.

**ВНИМАНИЕ!** На ход протекания опытов может влиять большая влажность воздуха в комнате и наличие остаточного заряда на предметах, поэтому желательно перед проведением работы проветрить комнату и каждый раз перед электризацией предметов трением быстро проносить их над горячей газовой горелкой (осторожно с бумагой!).

#### Ход работы

1. Подвесьте с помощью нити небольшой кусочек пенопласта ( $\approx 1 \text{ см} \times 1 \text{ см} \times 1 \text{ см}$ ) на держателе. Им может служить перекладина стула, ножка настольной лампы или деревянная линейка, прижатая книгой и нависающая над краем стола (рис. 8). Это будет ваш индикатор заряда.

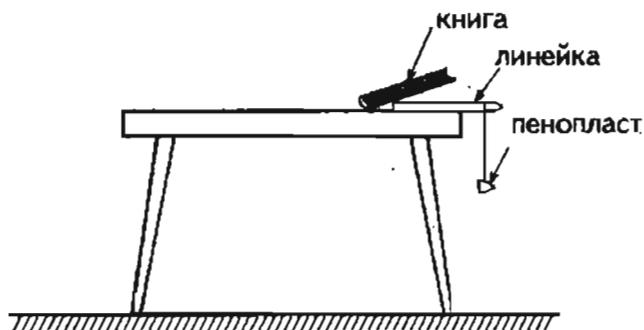


Рис. 8

*Лабораторные работы*

- Потрите линейку из оргстекла о кусок резины. **ИЗВЕСТНО**, что оргстекло при этом заряжается положительно. Перенесите часть этого заряда с линейки на кусочек подвешенного пенопласта. После касания он должен отталкиваться от линейки, так как получил заряд того же знака, что и линейка.
- Убедитесь, что кусок резины, о которую терли оргстекло, зарядился при этом отрицательно, т. е. притягивается к пенопласту, заряженному положительно. **НЕ ДОПУСКАЙТЕ** касания резины и пенопласта!
- Определите заряды, возникающие на телах при их попарном трении друг о друга. Результаты опытов занесите в таблицу.

**Выводы.** Оформите в виде утверждений.

**А.** При электризации трением положительный заряд, то есть недостаток электронов на теле возникает:

на \_\_\_\_\_ при трении о \_\_\_\_\_;  
на \_\_\_\_\_ при трении о \_\_\_\_\_.

**Б.** При электризации трением отрицательный заряд, то есть избыток электронов на теле, возникает:

на \_\_\_\_\_ при трении о \_\_\_\_\_;  
на \_\_\_\_\_ при трении о \_\_\_\_\_.

**В.** При трении \_\_\_\_\_ о \_\_\_\_\_ электроны не перемещаются с одного тела на другое и тела не заряжаются.

**1. Изучение закона сохранения зарядов и проводимости материалов**  
(выполняется в классе)

**Цель:** сравнение проводимости материалов и проверка выполнения закона сохранения зарядов.

**Оборудование:** два одинаковых электроскопа, пара тел для электризации трением (эбонитовая палочка и шерсть, стекло и шелк), стержни или шнуры из стекла, хлопка, оргстекла, меди, алюминия, эбонита и т. д. (рис. 9).

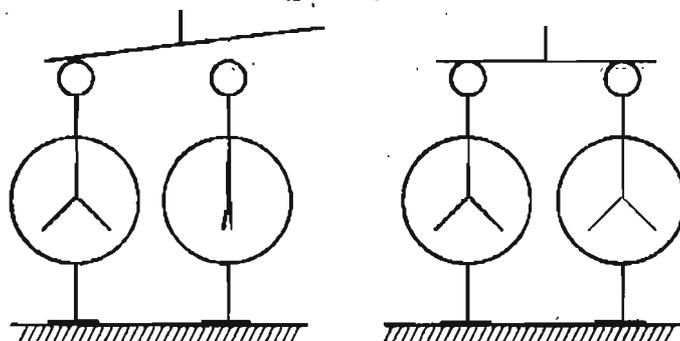


Рис. 9

**Ход выполнения работы**

- Наэлектризуйте эбонитовую палочку «←→» и зарядите один электроскоп. Убедитесь в правильности его шкалы. Для этого приведите его центральный стержень (или шарик, если на конце стержня шар) в соприкосновение со стержнем второго незаряженного электроскопа. Поскольку на второй электроскоп стечет поло-

Материал электризуемых тел	Материал электризовался при трении об			
	оргстекло	резину	полиэтилен	бумагу
Оргстекло		+		
Резина	-			
Полиэтилен				
Бумага				
Шерсть				

вина заряда, вы увидите (по числу делений), что первый показывает заряд в два раза меньше. Можно разрядить второй электроскоп, сняв с него заряд рукой или заземлив его о батарею отопления или водопроводный кран, а затем опять поделить пополам заряд первого электроскопа.

2. Электризуя один электроскоп, проверьте материалы проводов, нитей стержней из разных материалов на проводимость (см. рис. 9). Для этого достаточно зарядить один электроскоп и соединять его стержень со стержнем второго не непосредственным контактом, а проводом или нитью. Заполните таблицу.

Проводники	Диэлектрики (изоляторы)

3. Заряжая электроскопы зарядом одного знака (эбонитовой палочкой) или один из них отрицательным, а другой положительным (сухое стекло плюс натуральный шелк) зарядом, убе-

До соединения электроскопов		
Заряд на первом электроскопе $q_1$ делений шкалы	Заряд на втором электроскопе $q_2$ делений шкалы	$q_1 + q_2$
После соединения электроскопов		
Заряд на первом электроскопе $q'_1$ делений шкалы	Заряд на втором электроскопе $q'_2$ делений шкалы	$q'_1 + q'_2$

дитесь, что алгебраическая сумма зарядов двух электроскопов равна сумме зарядов на обоих приборах после соединения их проводником. Заполните таблицу.

Выводы.

1. Изоляторами являются: \_\_\_\_\_
2. Проводниками являются: \_\_\_\_\_
3. Сумма зарядов на электроскопах при их соединении \_\_\_\_\_

*Самостоятельные работы*

## Закон сохранения электрического заряда

### Пример решения задачи

Заряженная капля ртути с зарядом  $+3 \cdot 10^{-8}$  Кл разлетается на две капли, одна из которых оказывается заряженной до заряда  $+4 \cdot 10^{-8}$  Кл. Каков заряд второй капли?

Дано:  $q_1 = +3 \cdot 10^{-8}$  Кл  
 $q_2 = +4 \cdot 10^{-8}$  Кл  
 $q_3 = ?$

Решение. Из закона сохранения электрического заряда следует, что заряд на капле до ее распада равен сумме зарядов на образовавшихся каплях:

$$q_1 = q_2 + q_3;$$

$$q_3 = q_1 - q_2;$$

$$q_3 = +3 \cdot 10^{-8} \text{ Кл} - (+4 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}) = -10^{-8} \text{ Кл}$$

Ответ: заряд на второй капле  $-10^{-8}$  Кл.

### Уровень А

1. Два одинаковых металлических шара, один из которых несет заряд в  $3 \cdot 10^{-8}$  Кл, а другой незаряжен, приводят в соприкосновение. Каковы будут заряды на каждом из шаров?
2. Две капли масла сливаются в одну. До слияния заряд первой из них был  $+3 \cdot 10^{-9}$  Кл, а второй  $-2 \cdot 10^{-9}$  Кл. Каков заряд образовавшейся капли?

- Заряженная капля ртути с зарядом  $+3 \cdot 10^{-8}$  Кл разлетается на две капли, одна из которых оказывается заряженной до заряда  $-1 \cdot 10^{-8}$  Кл. Каков заряд второй капли?
- Определите заряд в кулонах иона  $\text{Co}^{2+}$ .
- Альфа-частица и электрон сталкиваются и сливаются, образуя ион. Зная заряды сталкивающихся частиц, определите заряд такого иона.

**Уровень Б**

- При соприкосновении двух одноименно заряженных металлических шаров разного размера, заряд перераспределяется так, что на одном из них оказывается заряд в 3 раза больший, чем на другом. Каковы заряды на шарах после соприкосновения, если до него каждый из них имел заряд в  $10^{-8}$  Кл?
- Сколько электронов и в каком направлении переместилось при соприкосновении двух одинаковых металлических шаров, если они имели заряды  $3 \cdot 10^{-9}$  Кл и  $-1 \cdot 10^{-8}$  Кл, соответственно?
- Шар электроскопа бомбардируют потоком альфа-частиц. За минуту лепестки электроскопа опали настолько же, насколько они опали бы при перенесении на него заряда в  $3 \cdot 10^{-9}$  Кл. Какова интенсивность потока альфа частиц, вырванная в частицах в секунду?
- Капля ртути, имеющая заряд  $+3 \cdot 10^{-8}$  Кл, разлетелась на три капли. Заряды распределились в соотношении 1 : 2 : 4, и заряд одной из них стал отрицательным. Каков заряд на каждой капле?

**Закон Кулона**

**Пример решения задачи**

Постройте график зависимости модуля силы взаимодействия двух шариков с зарядами от расстояния между их центрами в диапазоне от 0,1 до 0,5 м. Заряды шариков:  $q_1 = +2 \cdot 10^{-6}$  Кл и  $q_2 = -1 \cdot 10^{-6}$  Кл. Размер шариков около 1 см. Найдите по графику, на каком примерно расстоянии между шарами сила взаимодействия будет равна по величине 0,5 Н.

**Решение.** Величина силы взаимодействия двух зарядов при расстоянии  $r$  между ними рассчитывается по закону Кулона. Для  $r = 0,1$  м имеем:

$$F = \frac{k \cdot q_1 \cdot q_2}{r^2} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-6}}{10^{-2}} = 18 \cdot 10^{-1} = 1,8 \text{ (Н)}$$

Рассчитывая силу взаимодействия зарядов для других расстояний, составляем таблицу.

<b>r, м</b>	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
<b>F, Н</b>	1,8	0,45	0,2	0,11	0,072

На основе табличных значений  $F$  и  $r$  строим график (рис. 10).

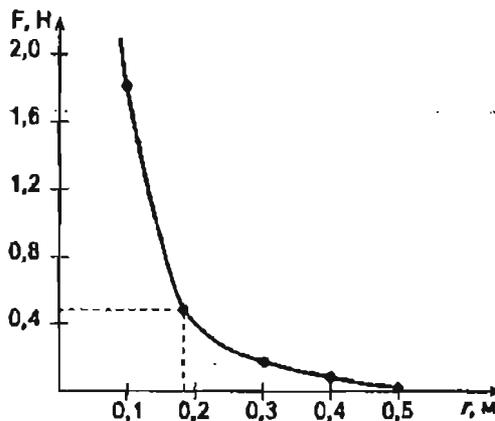


Рис. 10

На основе графика легко установить, что  $F = 0,5$  Н при  $r \approx 0,18$  м.

**Уровень А**

- Во сколько раз увеличится сила взаимодействия двух точечных зарядов в вакууме, если, не меняя расстояния между ними, увеличить заряды в 10 раз?
- Во сколько раз и как изменится сила взаимодействия двух точечных зарядов в вакууме, если, не меняя зарядов, изменить расстояние между ними в 3 раза?
- С какой силой притягиваются два точечных заряда  $+2 \cdot 10^{-9}$  Кл и  $-5 \cdot 10^{-9}$  Кл, находящиеся в воздухе на расстоянии 0,3 м? В керосине на том же расстоянии?
- Положительный заряд  $q_1$  взаимодействует с отрицательным зарядом  $q_2$  с силой  $F_{12}$ , как показано на рис. 11 а.

На каком из рисунков, 11 б — д правильно показана сила, с которой заряд  $q_1$  действует на заряд  $q_2$ ?

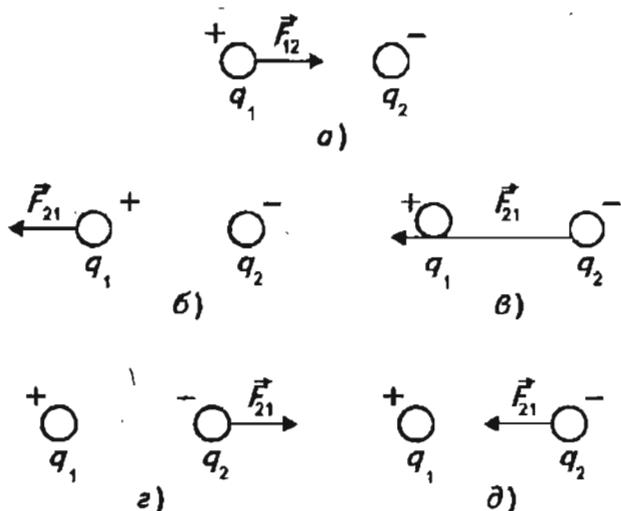


Рис. 11

14. Рассчитать силы взаимодействия двух одноименно заряженных металлических кубиков с ребром 0,01 м, если их центры находятся на расстоянии 0,5 м и 0,02 м. Заряды тел равны  $5 \cdot 10^{-6}$  Кл и  $1 \cdot 10^{-5}$  Кл соответственно. Изобразите на рисунке силы взаимодействия зарядов в масштабе 1 см = 1 Н.
15. Постройте график зависимости модуля силы взаимодействия двух шариков с зарядами от расстояния между их центрами в диапазоне от 0,05 до 0,4 м. Заряды шариков:  $-5 \cdot 10^{-6}$  Кл и  $+0,4 \cdot 10^{-6}$  Кл. Размер шариков около 1 см. Найдите по графику, на каком примерно расстоянии между телами сила взаимодействия будет равна 0,5 Н.

### Уровень Б

16. На рис. 12 приведена экспериментальная зависимость модуля силы притяжения двух зарядов от расстояния между ними. Перестройте график в координатах  $F_{12} - \frac{1}{r^2}$  и определите из него второй заряд, если первый имеет значение  $-5$  мкКл. Каков знак второго заряда?
17. Два заряда взаимодействуют с силой 16 Н. Какова будет сила взаимодействия при уменьшении зарядов и расстояния между ними в 2 раза?

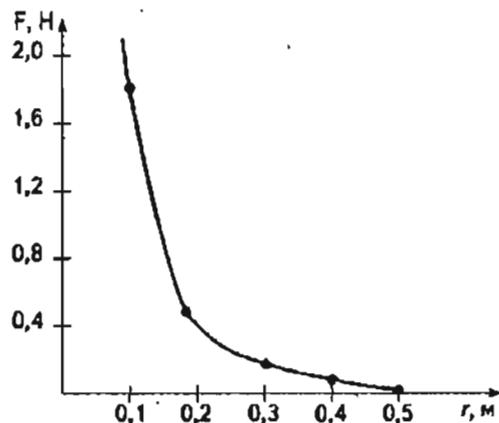


Рис. 12

18. Сила взаимодействия двух положительно заряженных шариков на расстоянии 1 м равна 5,4 Н. При перенесении с одного из них заряда  $2 \cdot 10^{-5}$  Кл на другой сила взаимодействия уменьшилась в 1,5 раза. Каковы исходные заряды на шариках?
19. Два одинаковых точечных заряда на расстоянии 20 см взаимодействуют с силой 0,1 Н. Определите эти заряды.
20. Заряды в 100 и 200 нКл в дистиллированной воде (диэлектрическая проницаемость воды равна 81) отталкиваются с силой 0,002 Н. На каком расстоянии они находятся?

## Совместное применение закона сохранения электрического заряда и закона Кулона

### Пример решения задачи

Два разноименных заряда  $q$  и  $-3q$  находятся на одинаковых по размеру металлических шарах на расстоянии, позволяющем считать их точечными. Как изменится сила их взаимодействия, если, не меняя расстояния между ними, на короткое время соединить их проводником?

**Решение.** По условию заряды притягиваются друг к другу с силой  $F_1 = \frac{3q^2}{r^2}$ . Суммарный заряд на двух шарах равен  $q + (-3q) = -2q$ . После соединения шаров проволокой он распределится поровну между ними. Таким образом, на каждом из них ока-

жется заряд равный  $-q$ , и они начнут отталкиваться друг от друга с силой  $F_2 = \frac{q^2}{r^2}$ .

Отношение  $\frac{F_1}{F_2} = 3$ .

О т в е т : сила взаимодействия изменит направление на противоположное и уменьшится в 3 раза.

**Уровень А**

21. Одинаковые металлические шарики, имеющие заряды  $+4 \cdot 10^{-5}$  Кл и  $-2 \cdot 10^{-5}$  Кл притягиваются на расстоянии 1 м с силой 7,2 Н. С какой силой они будут взаимодействовать, если их на короткое время соединить проводником, а затем проводник убрать? Можно ли утверждать, что они по-прежнему будут притягиваться?

**Уровень Б**

22. Два одноименных заряда  $q$  и  $+2q$  находятся на одинаковых по размеру металлических шарах на расстоянии, позволяющем считать их точечными. На сколько процентов изменится сила их взаимодействия, если, не меняя расстояния между ними, на короткое время соединить их проводником?

23. Докажите, что если два одинаковых шарика заряжены одноименно, то при соединении их проводом без изменения расстояния между центрами сила взаимодействия всегда будет увеличиваться.

**Принцип суперпозиции**

**Пример решения задачи**

Определите построением модуль силы  $\vec{F}$ , действующей на заряд  $Q$ , и ее направление, если его поместили в центр равностороннего треугольника, в вершинах которого располагаются одинаковые заряды  $q$ . Рассмотрите случай, когда два заряда  $q$  — положительные, а третий  $q$  и  $Q$  — отрицательные (рис. 13).

Р е ш е н и е . Так как в вершинах треугольника все заряды одинаковы, то силы, действующие на заряд в центре, по величине будут одинаковы. Поскольку векторы  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$  расположены под углом  $120^\circ$ , их векторная сумма равна длине вектора  $\vec{F}_3$ . Таким

образом, результирующий вектор  $\vec{R}$  в два раза длиннее  $\vec{F}_3$  и направлен вниз.

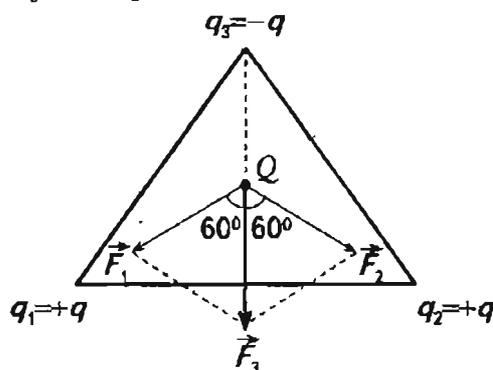


Рис. 13

**Уровень А**

24. Величина силы, действующей на заряд  $q_3$  со стороны заряда  $q_1$ , равна 1 Н, а со стороны заряда  $q_2$  — 2 Н (рис. 14).



Рис. 14

Перерисуйте в тетрадь расположение зарядов в пространстве и найдите результирующую силу, действующую на заряд  $q_3$  со стороны двух зарядов в следующих случаях:

- а) все заряды положительные;
- б) все заряды отрицательны;
- в)  $q_1, q_2$  — положительны,  $q_3$  — отрицателен;
- г)  $q_1, q_3$  — положительны,  $q_2$  — отрицателен.

25. Определите построением модуль силы  $\vec{F}$ , действующей на заряд  $Q$ , и ее направление, если его поместили в центр равностороннего треугольника, в вершинах которого располагаются одинаковые по величине заряды  $q$ . Рассмотрите два случая:

- а)  $q$  и  $Q$  — положительные заряды;
- б)  $q$  — положительные, а  $Q$  — отрицательный;
- в) два заряда  $q$  — положительные, а третий  $q$  и  $Q$  — отрицательные.

Величину силы взаимодействия между  $q$  и  $Q$  изобразите стрелкой длиной 1 см.

**Уровень Б**

26. Заряды  $q_1, q_2, q_3, q_4$  расположены в вершинах квадрата и действуют на заряд  $Q$ , расположенный в центре квадрата, с силами 1, 2, 3, 4 Н, соответственно. Куда направлена и чему равна равнодействующая сила, действующая на заряд  $Q$ ?

Рассмотреть случаи, когда:

- $Q$  и все остальные заряды положительны;
- $Q$  отрицателен, а все остальные заряды положительны;
- $Q, q_1, q_2$  положительны, а  $q_3, q_4$  — отрицательны.

### Совместное применение закона Кулона и принципа суперпозиции

**Указание.** Во всех задачах необходимо с помощью закона Кулона найти модули сил, действующих на выбранный заряд со стороны каждого из остальных зарядов, а затем воспользоваться принципом суперпозиции для нахождения равнодействующей всех сил.

**Уровень А**

27. Найдите модуль и направление силы  $\vec{F}$ , действующей на заряд  $Q = -1 \cdot 10^{-6}$  Кл, со стороны зарядов  $q_1 = +2 \cdot 10^{-6}$  Кл и  $q_2 = -3 \cdot 10^{-6}$  Кл, которые расположены в точках  $A$  и  $B$  на расстоянии 0,2 м друг от друга в воздухе. Все заряды считать точечными. Рассмотреть следующие случаи расположения заряда  $Q$ :

- на отрезке  $AB$  на одинаковом расстоянии от обоих зарядов;
- вне отрезка  $AB$  на линии, соединяющей заряды, на расстоянии 0,1 м от первого;
- вне отрезка  $AB$  на линии, соединяющей заряды, на расстоянии 0,1 м от второго;
- вне отрезка  $AB$  на расстоянии 0,2 м от каждого из зарядов.

**Уровень Б**

28. Точечные заряды  $q_1 = +1 \cdot 10^{-6}$  Кл и  $q_2 = -4 \cdot 10^{-6}$  Кл закреплены в точках  $A$  и  $B$  на расстоянии 0,2 м

друг от друга в воздухе. Найдите положение точки  $C$ , в которой сила, действующая со стороны данных зарядов на третий заряд, равна нулю. Будет ли положение точки  $C$  зависеть от знака третьего заряда?

29. Четыре одинаковых заряда по 100 нКл жестко закреплены в вершинах квадрата со стороной 20 см. Чему будет равна сила, действующая на заряд  $-200$  нКл со стороны этих зарядов, если его расположить на середине одной из сторон квадрата.

### Совместное применение законов электростатики и механики

**Указание.** Необходимо с помощью закона Кулона и принципа суперпозиции рассчитать электростатические силы, действующие на заряженное тело. Затем изобразить на рисунке все силы, действующие на данное тело, известные из механики (сила тяжести, натяжения нитей и т. д.), и применить известный закон Ньютона о том, что если тело покоится, то геометрическая (векторная) сумма всех сил, действующих на тело, равна нулю. При этом можно либо воспользоваться прямым векторным сложением по правилу параллелограмма (если сил две или три), либо выбрать оси координат и записать равенство нулю проекций на эти оси всех сил, действующих на тело.

**Уровень А**

30. Шарик с зарядом  $10^{-7}$  Кл массой 0,002 кг висит на нити в воздухе. Какова будет сила натяжения нити, если снизу к этому шарiku на расстоянии 0,1 м поднести такой же шарик с таким же зарядом (рис. 15)? Как изменится сила натяжения, если заряд шарика изменится на противоположный? ( $g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ).

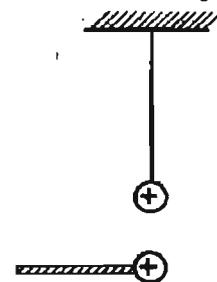


Рис. 15

**Уровень Б**

31. Два металлических шарика массами 1 г висят на вертикальных нитях, касаясь друг друга. Их заряжают эбонитовой палочкой, и они расходятся так, что нити образуют угол  $30^\circ$  с вертикалью. Какой заряд был сообщен каждому шарика, если длина нити 50 см (рис. 16)?

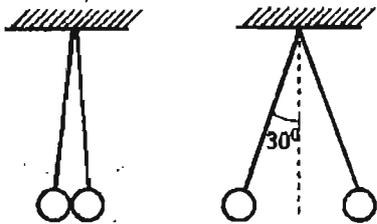


Рис. 16

32. Три шарика связали попарно нитями длиной  $L$  и сообщили каждому заряд  $q$ . Какова сила натяжения нитей, если шарики лежат на гладком горизонтальном столе из диэлектрика (рис. 17)?

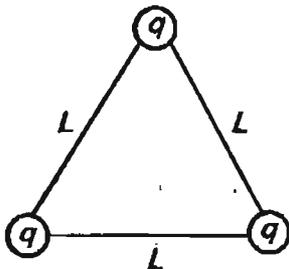


Рис. 17

33. С каким ускорением начнут двигаться ионы  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Cl}^-$ , расположенные в воде на расстоянии 100 нм? Силу тяжести не учитывать.

*Контрольная работа*

**Уровень А (рассчитана на 45 мин)**

1. Капля, имеющая положительный заряд  $+e$ , при освещении потеряла один электрон. Каким стал заряд капли?

- А. 0.
- Б.  $-2e$ .
- В.  $+2e$ .
- Г. Среди ответов А–В нет правильного.

2. Как изменится модуль силы кулоновского взаимодействия двух точечных зарядов, если расстояние между ними увеличить в 2 раза?

- А. Увеличится в 2 раза.
- Б. Уменьшится в 2 раза.
- В. Увеличится в 4 раза.
- Г. Уменьшится в 4 раза.

3. Сила взаимодействия между двумя точечными заряженными телами равна  $F$ . Чему станет равна сила взаимодействия между телами, если каждый заряд на телах увеличить в 3 раза?

- А. Увеличится в 3 раза.
- Б. Уменьшится в 3 раза.
- В. Увеличится в 9 раз.
- Г. Уменьшится в 9 раз.

4. Какое из выражений, приведенных ниже, выражает в СИ силу взаимодействия точечных зарядов  $+q_1$  и  $-q_2$ , расположенных на расстоянии  $r$  друг от друга в вакууме? Притягиваются они или отталкиваются?

- А.  $\frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$ , притягиваются.
- Б.  $\frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$ , отталкиваются.
- В.  $(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}) \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$ , притягиваются.
- Г.  $(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}) \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$ , отталкиваются.

5. Как направлена кулоновская сила  $\vec{F}$ , действующая на положительный точечный заряд, помещенный в центр квадрата (рис. 18), в углах которого находятся заряды:  $+q, +q, -q, -q$ ?

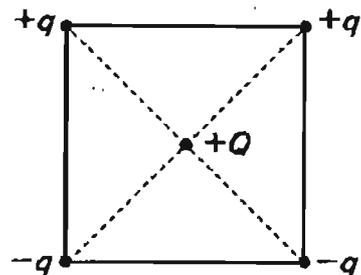


Рис. 18

- А. Вправо.       Б. Влево.  
 В. Вверх.       Г. Вниз.

6. С какой силой два точечных заряда, расположенные на расстоянии 0,1 м друг от друга, действуют на третий заряд, который располагается на одной линии с первыми двумя зарядами, но правее заряда  $q_2$  на 0,1 м? Величины зарядов:

$$q_1 = +2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}; q_2 = -2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}; q_3 = +3 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}.$$

Все заряды погружены в жидкость с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 6$ .

### Уровень Б (рассчитана на 45 мин)

1. Как изменится модуль силы взаимодействия двух одинаковых металлических шаров, имеющих заряды  $+q_1$  и  $+q_2$ , если шары привести в соприкосновение и раздвинуть на прежнее расстояние?

- А. Не изменится.       Б. Увеличится.  
 В. Уменьшится.  
 Г. Ответ неоднозначен.

2. Как изменится модуль силы  $\vec{F}$  взаимодействия двух точечных зарядов, если расстояние между ними уменьшить в 2 раза, а один из зарядов увеличить в 2 раза?

- А. Уменьшится в 2 раза.  
 Б. Увеличится в 8 раз.  
 В. Увеличится в 4 раза.  
 Г. Не изменится.

3. Как направлена кулоновская сила  $F$ , действующая на отрицательный точечный заряд, помещенный в центр квадрата (рис. 19), в углах которого находятся заряды:  $+q, +q, -q, -q$ ?

- А. Вправо.       Б. Влево.  
 В. Вверх.       Г. Вниз.

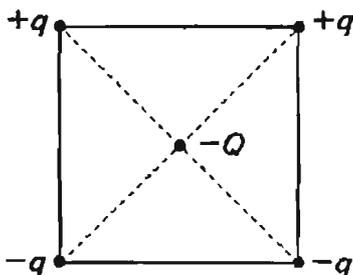


Рис. 19

4. Найдите силу натяжения одинаковых нитей длиной 10 см, которыми связаны четыре шарика, лежащие на гладком столе, если каждый из них несет заряд  $5 \cdot 10^{-7}$  Кл. Шарики связаны так, что оказываются в вершинах квадрата.
5. Два одинаковых металлических заряженных шарика подвешены на нитях одинаковой длины. Оттолкнувшись, шарики отходят друг от друга на угол  $60^\circ$ . Их приводят в соприкосновение и отпускают, после чего они снова расходятся так, что угол между нитями равен  $90^\circ$ . Какие заряды были на шариках первоначально? Заряды считать точечными, масса шариков 0,5 г, длина нити 40 см.

*Творческие задания*

### Уровень А

1. Составьте реферат на тему «Жизнь Шарля Кулона и его опыты по взаимодействию зарядов».

### Уровень Б

1. Составьте реферат на тему «Развитие представлений человечества на природу электрического заряда от древних греков до середины XX века».

2. Придумайте устройство, которое могло бы помочь обнаружить неравномерность распределения заряда на теле. Определите с помощью него распределение заряда на пластмассовой линейке длиной 30 см, которую потерли бумагой.

Можно ли с помощью вашего устройства показать, что при приближении к металлическому незаряженному протяженному предмету заряженного тела на разных концах металлического тела обнаруживается заряд разного знака?

3. При конструировании модели атома в начале XX века встал вопрос, как должны быть расположены в атоме положительные заряды и электроны, чтобы атом был устойчив. Предложите систему положительных и отрицательных зарядов, сумма которых равна нулю и силы взаимодействия которых скомпенсированы. Будет ли такое равновесие устойчивым?

**НАПОМИНАЕМ:** равновесие устойчиво, если при смещении одного из тел системы возникают силы, возвращающие его в исходное положение.



# Напряженность электрического поля

## Изучив эту тему,

- вы узнаете о новом материальном объекте — электрическом поле;
- поймете, что наблюдения и эксперимент служат основой для гипотез и научных теорий;
- научитесь вычислять силу, действующую на электрический заряд в электрическом поле и определять вид движения заряженной частицы в электрическом поле;
- сможете предъявлять информацию об электрическом поле, окружающем заряженные тела

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

## Электрическое поле

Английский ученый Майкл Фарадей дал явлению взаимодействия электрических зарядов следующее толкование: каждый заряд создает вокруг себя электрическое поле, которое действует на другой заряд, внесенный в это поле. Электрическое поле — это материальный объект, непрерывный в пространстве, проявляющийся в том, что действует на другие электрические заряды.

## Основные понятия:

Электрическое поле • Напряженность электрического поля • Однородное поле • Линии напряженности электрического поля • Поле точечного заряда, шара, плоскости

## Теории дальнего действия и ближнего действия

В настоящее время считается, что взаимодействие между зарядами правильно описывает теория ближнего действия. Согласно этой теории, любое взаимодействие осуществляется с помощью промежуточных агентов и распространяется с конечной скоростью, в отличие от теории дальнего действия, по которой одно тело действует на другое непосредственно через пустоту, и это действие передается

мгновенно. Электрическое поле распространяется в пространстве с большой, но конечной скоростью  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Если представить, что с помощью заряженной эбонитовой палочки, находящейся на Земле, воздействуют на заряженный шарик на Венере ( $r \approx 60$  млн. км), и затем удаляют палочку в сторону от Венеры, то шарик в этом гипотетическом опыте «почувствует» уменьшение силы взаимодействия только через 3,5 мин. Согласно теории дальнего действия, это должно было бы произойти мгновенно.

### Напряженность электрического поля

Напряженность электрического поля (не путать с электрическим напряжением) — физическая величина  $\vec{E}$ , равная отношению силы  $\vec{F}$ , действующей на пробный точечный положительный заряд  $q$  (рис. 20), к величине этого заряда:

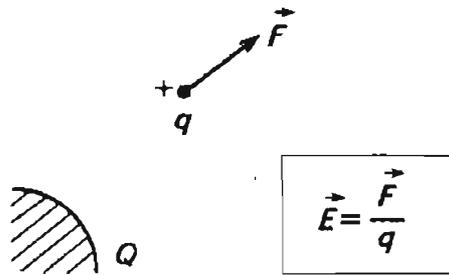


Рис. 20

Напряженность электрического поля называют *силовой характеристикой поля*. Как показывает опыт, эта величина не зависит от пробного заряда  $q$ , а определяется зарядами, создающими поле.

Так, взаимодействие двух зарядов с силой  $F_k = k \frac{Qq}{r^2}$ , можно толковать как взаимодействие пробного заряда  $q$  с электрическим полем, созданным зарядом  $Q$ . Тогда напряженность этого поля определяется только зарядом  $Q$ , создающим поле, и не зависит от пробного заряда  $q$ :

$$E = \frac{F_k}{q} = k \frac{Q}{r^2}.$$

Единицей измерения напряженности в СИ является  $\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$  или  $\frac{\text{В}}{\text{м}}$  (см. «Потенциал электрического поля»).

**Однородное электрическое поле** — это электрическое поле, напряженность которого в любой точке одинакова.

**Силовая линия электрического поля** — это линия, касательная к которой в каждой точке совпадает с вектором напряженности поля  $\vec{E}$ . Силовые линии (линии напряженности) поля в электростатике начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных.

**Принцип суперпозиции полей.** Если в данной точке пространства разные заряды создают поля напряженности  $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_n$  (рис. 21), то суммарная напряженность поля в данной точке равна векторной сумме отдельных напряженностей:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n.$$

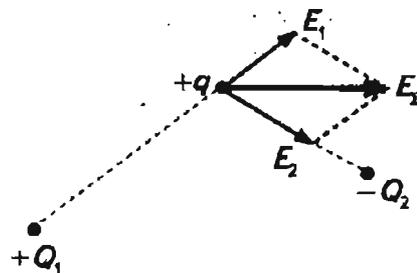


Рис. 21

**Напряженность электрического поля точечного заряда.** Из закона Кулона и определения напряженности поля следует:

$$|\vec{E}| = E = \frac{|Q|}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{k|Q|}{\epsilon r^2},$$

где  $Q$  — заряд, создающий поле (рис. 22).

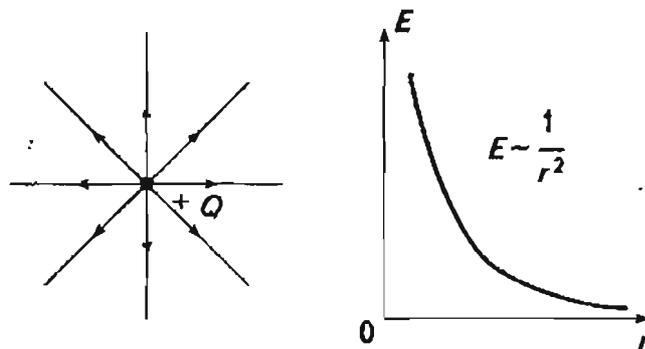


Рис. 22

**Напряженность электрического поля заряженного шара:**

- а) на расстояниях  $r \gg R$  (радиус шара) шар можно считать точечным зарядом;
- б) вне равномерно заряженного шара картина силовых линий электрического поля полностью совпадает с картиной линий точечного заряда, поэтому при  $r \gg R$

$$E = k \cdot \frac{|Q|}{\epsilon r^2};$$

- в) внутри металлического шара  $E = 0$ , так как движение свободных электронов в металле будет продолжаться до тех пор, пока это условие не будет выполнено.

**Напряженность электрического поля равномерно заряженной пластины.** Можно показать, что вблизи равномерно заряженной пластины (рис. 23)

напряженность поля одинакова, направлена перпендикулярно пластине и равна:

$$E = \frac{|\sigma|}{2\epsilon\epsilon_0} = \frac{2k\pi|\sigma|}{\epsilon},$$

где  $\sigma = \frac{Q}{S}$  — плотность заряда на пластине.

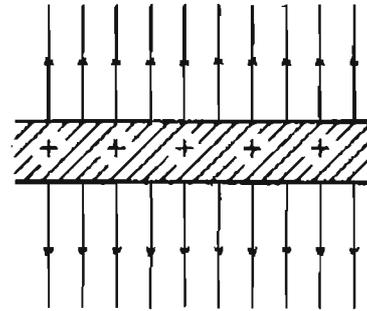


Рис. 23

Законы в виде формул	Обозначения величин, единицы измерения в СИ, справочные значения констант
<p>Определение напряженности</p> $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ $E = k \frac{ Q }{\epsilon r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ Q }{\epsilon r^2}$	<p><math>\vec{E}</math> — напряженность электрического поля,</p> $\frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = \frac{\text{В}}{\text{м}}$ <p><math>\vec{F}</math> — сила, действующая на пробный заряд <math>q</math></p> <p><math>E</math> — модуль вектора напряженности поля, создаваемого точечным зарядом <math>Q</math> на расстоянии <math>r</math> в среде с диэлектрической проницаемостью <math>\epsilon</math></p> $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$
<p>Принцип суперпозиции полей</p> $\vec{E}_{\Sigma} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$	<p><math>\vec{E}_{\Sigma}</math> — суммарная напряженность поля, созданного <math>n</math> зарядами, в данной точке пространства,</p> <p><math>\vec{E}_n</math> — напряженность поля, созданного <math>n</math>-ым зарядом</p>
<p>Поле заряженной пластины</p> $E = \frac{ \sigma }{2\epsilon\epsilon_0}$	<p><math>\sigma = \frac{Q}{S}</math> — плотность заряда на пластине <math>\left(\frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}\right)</math></p> <p><math>Q</math> — заряд на пластине, создающей поле</p> <p><math>S</math> — площадь пластины</p>

*Лабораторные  
работы*

### 1. Определение направления вектора напряженности электрического поля

**Цель работы.** Построить экспериментально картину распределения поля в пространстве вокруг заряженного тела и убедиться, что наличие поля в данной точке пространства и наличие заряженного тела рядом с этой точкой пространства не всегда совпадают.

**Оборудование:** две пластмассовые линейки, пенопласт размером примерно  $0,5 \times 0,5$  см на нитке, держатель, игла, кусок поролон, шарик от пинг-понга или пластмассовый шарик примерно того же размера, фольга, лист бумаги.

**Ход работы.**

1. Изготовьте индикаторы электрического поля трех видов.

**Первый** вы уже изготавливали из кусочка пенопласта, подвешенного на нити в лабораторной работе 1 по теме «Законы взаимодействия неподвижных зарядов». Зарядите шарик положительно, потерев стеклянный стакан о шелк или оргстекло о полиэтилен.

**Второй** индикатор можно изготовить, вырезав из фольги небольшую стрелку и аккуратно положив ее на тупой конец иглы, воткнутой вертикально в поролон (рис. 24). Для устойчивости концы стрелки нужно слегка опустить, а в центре, у кончика иглы, пальцами сделать небольшое углубление. Убедитесь что стрелка легко вращается вокруг своей оси.

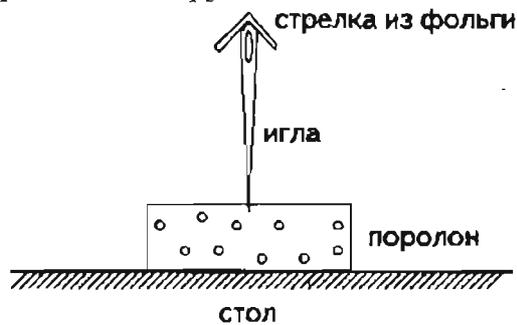


Рис. 24

Действие этого индикатора основано на поляризации металла вблизи заряженного тела.

Стрелка приобретает заряд противоположного заряду тела знака и притягивается к телу.

Третий индикатор можно выполнить из сухой легкой бумаги аналогично второму, поскольку диэлектрики тоже могут поляризоваться под действием внешнего поля.

2. Изготовьте заряженный металлический шар. Для этого оберните шарик от пинг-понга фольгой. Можно также покрыть его графитом (грифелем мягкого простого карандаша). Положите его на кусок поролон или другого изолятора, чтобы он не мог перемещаться. Зарядите его потерев пластиковый корпус ручки о шерсть, перенеся заряд с ручки на «металлизированный» шар.
3. Обнося первый индикатор вокруг заряженного шара на равном расстоянии от его «экватора» зарисуйте направление силы, действующей на положительный пробный заряд, находящийся на пенопластовом индикаторе, подвешенном на нити, как показано на рис. 25.



Рис. 25

4. Перемещайте индикатор вокруг шара на большем удалении от его центра, оставаясь в плоскости «экватора». Изобразите на том же рисунке векторы сил, показывающие их соотношение при первом и втором обходе. Проведите несколько силовых линий электрического поля.
5. С помощью второго и третьего индикаторов убедитесь, что они поворачиваются при перемещении их вокруг шара вдоль направления силовых линий электрического поля.
6. Повернув шар на поролоне, с помощью индикатора убедитесь, что картина расположения векторов напряженности поля остается симметричной в «экваториальной» плоскости.

7. Снимите фольгу с пластмассового шарика, зарядите только одну «точку» шарика в «экваториальной» плоскости. Исследуйте картину электрического поля в этом случае. Зарисуйте ее в тетрадь.

8. Оберните фольгой линейку, положите ее на изолятор, как показано на рис. 26, и зарядите, после чего исследуйте картину поля вдоль линейки. Зарисуйте силовые линии электрического поля.

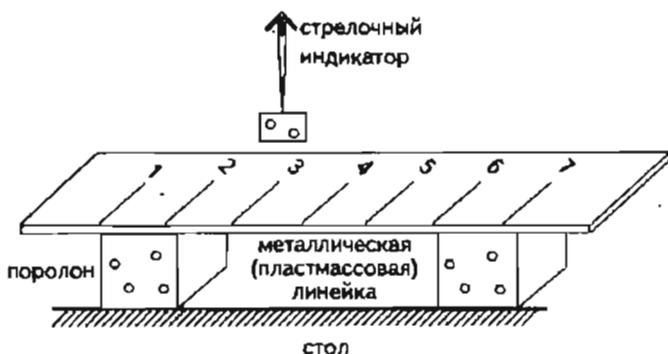


Рис. 26

9. С помощью второго или третьего индикатора проследите, как стрелка реагирует на пронесение мимо нее заряженной пластмассовой ручки. Запишите наблюдения. Как меняется поведение стрелки, если между индикатором и заряженной ручкой поместить лист бумаги, кусок целлулоида, плоский лист фольги, зеркальце (рис. 27)? Опишите наблюдения.

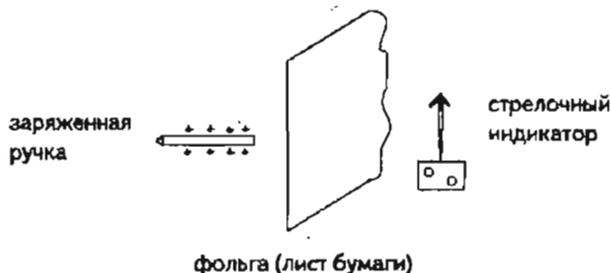


Рис. 27

10. Попросите кого-нибудь подержать заряженную ручку за непрозрачным экраном из бумаги или ткани и с помощью индикатора обнаружьте, в какой точке пространства по другую сторону экрана электрическое поле имеет максимальную напряженность.

11. Оформите выводы.

1. Вектор напряженности  $\vec{E}$  электрического поля вокруг металлического шара направлен \_\_\_\_\_ (уровень А) и с увеличением расстояния напряженность поля \_\_\_\_\_ (уровень Б).
2. Вектор напряженности электрического поля вблизи плоскости направлен \_\_\_\_\_ (уровень А).
3. Напряженность поля за экраном из \_\_\_\_\_ равна нулю, несмотря на присутствие рядом заряженного тела (уровень А), так как \_\_\_\_\_ (уровень Б).

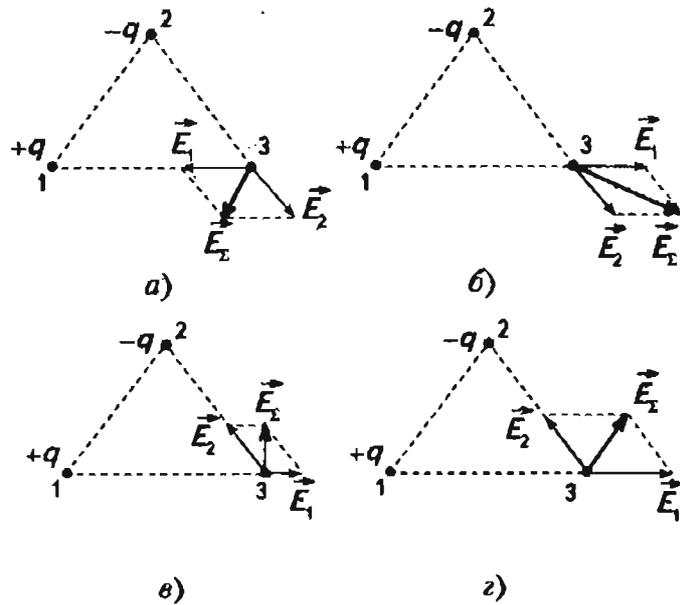
*Самостоятельная работа*

**Обучающий тест**

1. Как узнать, что в данной точке пространства существует электрическое поле?
  - А. Поместить в эту точку магнитную стрелку и посмотреть, ориентируется ли она.
  - Б. Поместить в эту точку заряд и посмотреть, действует ли на него сила.
  - В. Поместить в эту точку лампу накаливания и посмотреть, загорится ли она.
  - Г. Этого нельзя определить экспериментально, так как поле не действует на наши органы чувств.
2. Направление вектора напряженности электрического поля совпадает с направлением силы, действующей на ...
  - А. незаряженный металлический шар, помещенный в поле.
  - Б. отрицательный пробный заряд, помещенный в поле.
  - В. положительный пробный заряд, помещенный в поле.
  - Г. ответа нет, так как напряженность поля — скалярная величина.
3. Сила, действующая в поле на заряд в 0,00002 Кл, равна 4 Н. Напряженность поля в этой точке равна:

- А.  $200\,000 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ .
  - Б.  $0,00008 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ .
  - В.  $0,00008 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ .
  - Г.  $5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Кл}}{\text{Н}}$ .
4. На заряд  $q$  со стороны заряда  $Q$  действует сила притяжения  $F$ . С точки зрения теории близкодействия это происходит потому, что...
- А. заряды  $Q$  и  $q$  одного знака.
  - Б. поле, созданное зарядом  $Q$ , взаимодействует с полем, созданным зарядом  $q$ .
  - В. заряд  $q$  создает поле, которое взаимодействует с зарядом  $Q$ .
  - Г. заряд  $Q$  создает поле, и заряд  $q$  взаимодействует с этим полем.
5. На точечный заряд  $q$  со стороны точечного заряда  $Q$  действует сила притяжения  $F$ . Заряд  $q$  увеличивают в 4 раза. Напряженность поля, создаваемого зарядом  $Q$  в точке пространства, где расположен заряд  $q$ ,...
- А. не изменится.
  - Б. увеличится в 4 раза.
  - В. уменьшится в 4 раза.
  - Г. это зависит от расстояния между зарядами.
6. На точечный заряд  $q$  со стороны точечного заряда  $Q$  действует сила притяжения. Расстояние между ними увеличивают в 4 раза. Напряженность поля, создаваемого зарядом  $Q$  в точке пространства, где расположен заряд  $q$ ,...
- А. не изменится.
  - Б. увеличится в 4 раза.
  - В. уменьшится в 4 раза.
  - Г. уменьшится в 16 раз.
7. Два одинаковых разноименных заряда расположены в вершинах равностороннего треугольника 1 и 2. На каком из рисунков правильно показан способ нахождения суммарной напряженности поля в вершине 3?

Рис. 28



- А. На рис. 28 а.
- Б. На рис. 28 б.
- В. На рис. 28 в.
- Г. На рис. 28 г.

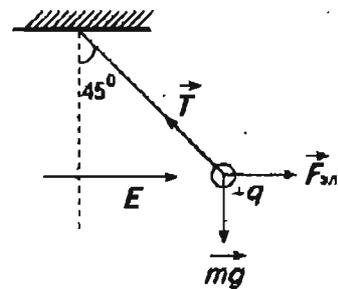
*Практикум по  
решению задач*

### Определение напряженности электрического поля

#### Пример решения задачи

В горизонтальном однородном поле маленький заряженный шарик ( $q = 100 \text{ нКл}$ ) массой  $100 \text{ мг}$ , подвешен на нити, которая составляет с вертикалью  $45^\circ$ . Какова напряженность электрического поля?

Рис. 29



Дано:  $m = 100 \text{ мг} = 10^{-4} \text{ кг}$ ,

$$\alpha = 45^\circ;$$

$$q = 100 \text{ нКл} = 10^{-7} \text{ Кл};$$

$$E - ?$$

**Решение.** На шарик действуют силы: со стороны электростатического поля  $F_{\text{эл}} = qE$ , сила тяжести  $mg$  и сила натяжения нити  $T$ , векторная сумма которых равна 0 (рис. 29).

Как видно из рисунка,  $\text{tg}\alpha = \frac{F_{\text{эл}}}{mg} \Rightarrow$

$$F_{\text{эл}} = mg \text{ tg}\alpha = qE.$$

Поэтому:

$$E = \frac{mg \cdot \text{tg}\alpha}{q} = \frac{10^{-4} \cdot 10 \cdot 1}{10^{-7}} = 10^4 \left( \frac{\text{В}}{\text{м}} \right).$$

### Уровень А

1. Для установления напряженности электрического поля в некоторую точку пространства помещают пробный заряд  $q = 2 \text{ мкКл}$ . Выясняется, что на него действует сила  $0,04 \text{ Н}$ . Чему равна напряженность поля в этой точке?

2. Какой заряд помещают в точку поля с напряженностью  $E = 400 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ , если на него действует сила  $2 \cdot 10^{-4} \text{ Н}$ ?

3. Какая сила начнет действовать на пылинку со стороны электрического поля с напряженностью  $200 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ , если заряд пылинки  $2 \text{ нКл}$ ?

### Уровень Б

Для установления напряженности электрического поля в некоторую точку пространства помещают пробный заряд  $q$ . Какие ограничения должны быть выполнены, чтобы, зная силу, действующую на этот заряд, можно было рассчитать напряженность в данной точке пространства?

В горизонтальном однородном поле маленький заряженный шарик ( $q = 200 \text{ нКл}$ ) массой  $50 \text{ мг}$ , подвешен на нити, которая составляет с вертикалью угол  $30^\circ$ . Какова напряженность электрического поля?

Полый пластмассовый шарик прикреплен короткой шелковой нитью к металлической пластине, лежащей на дне аквариума, заполненного керо-

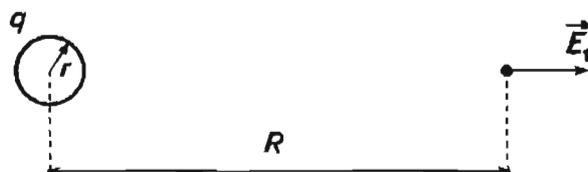
сином. На шарике объемом  $50 \text{ см}^3$  и массой  $2 \text{ г}$  равномерно распределен положительный заряд  $25 \text{ мкКл}$ . В верхней части аквариума параллельно нижней пластине укрепляют вторую пластину и подключают к электрофорной машине, что позволяет создать между пластинами напряженность поля  $100 \frac{\text{В}}{\text{см}}$ . Каково натяжение нити до подключения электрофорной машины; после подключения к пластине положительного полюса электрофорной машины; к ее отрицательно-му полюсу? Плотность керосина  $800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

## Поле точечного заряда

### Пример решения задачи

Найдите напряженность электрического поля, созданного заряженным шариком ( $q = 2 \text{ мкКл}$ ) радиусом  $1 \text{ см}$  в воздухе на расстоянии  $20 \text{ см}$  от его центра (рис. 30). Как изменится напряженность поля, если шарик поместить в этиловый спирт (диэлектрическая проницаемость спирта равна  $24$ )?

Рис. 30



Дано:  $r = 1 \text{ см};$   
 $R = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м};$   
 $\epsilon_1 = 1;$   
 $\epsilon_2 = 24;$   
 $E_1 - ? E_2 - ?$

**Решение.** Поскольку радиус шара гораздо меньше расстояния от центра шара до точки поля, в которой следует найти напряженность, воспользуемся для ее расчета формулой для напряженности поля точечного заряда:

$$E_1 = \frac{kq}{\epsilon r^2} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 10^{-2}} = 4,5 \cdot 10^5 \left( \frac{\text{В}}{\text{м}} \right).$$

Для шара, погруженного в спирт, напряженность поля в  $\epsilon = 24$  раз меньше.

$$E_2 = \frac{E_1}{24} \approx 1,9 \cdot 10^4 \left( \frac{\text{В}}{\text{м}} \right).$$

### Уровень А

7. Найдите напряженность электрического поля, созданного заряженным шариком ( $q = 4$  мкКл) радиусом 1 см в воздухе на расстоянии 10 см от его центра. Как изменится напряженность поля, если шарик поместить в керосин (диэлектрическая проницаемость керосина равна 2)?
8. На каком расстоянии от точечного заряда 10 нКл, напряженность поля такая же, как и на расстоянии 20 см от точечного заряда в 20 нКл?

### Уровень Б

9. Рассчитать при  $r = 5, 10, 15, 20, 25, 30$  см и построить график зависимости величины напряженности электростатического поля от расстояния для металлического шара радиуса 12 см, несущего заряд  $10^{-5}$  Кл. Определить по графику напряженность поля в 2 см от его поверхности.

## Принцип суперпозиции

### Уровень А

10. Два заряда создают в точке, расположенной на середине соединяющего их отрезка, поля напряженностью  $20 \frac{\text{В}}{\text{м}}$  и  $30 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ . Изобразите графически с соблюдением масштаба напряженности поля, создаваемые каждым из зарядов, и суммарную напряженность в этой точке, если заряды оба положительные; оба отрицательные; разного знака.
11. Два одинаковых заряда расположены в вершинах при основании равнобедренного треугольника со сторонами 10, 20 и 20 см. Напряженность поля, создаваемая каждым зарядом в третьей вершине, равна  $100 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ . Найдите построением, куда будет направлена суммарная напряженность в случаях, когда оба заряда положительны; оба отрицательны; разного знака.

### Уровень Б

12. Рассчитайте направление и модуль вектора напряженности в вершине  $C$  треугольника, если два одноименных (разноименных) заряда расположены в вершинах  $A$  и  $B$  и создают напряженности  $200$  и  $300 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ . Длины сторон треугольника  $AB$ ,  $BC$  и  $AC$  равны соответственно:
- а) 30, 40 и 50 см  
б) 50, 50 и 50 см.

## Совместное применение понятия напряженности, формулы для напряженности поля точечного заряда, принципа суперпозиции полей и знаний механики

### Пример решения задачи

Точечные заряды в  $+10^{-8}$ ,  $-2 \cdot 10^{-8}$ ,  $+3 \cdot 10^{-8}$  и  $-4 \cdot 10^{-8}$  Кл расположены в вершинах квадрата со стороной в 0,2 м. Рассчитайте напряженность электрического поля в центре этого квадрата. Как теперь определить силу, действующую на заряд  $q = 5 \cdot 10^{-8}$  Кл, помещенный в эту точку?

Дано:  $Q_1 = +10^{-8}$  Кл;  
 $Q_2 = -2 \cdot 10^{-8}$  Кл;  
 $Q_3 = +3 \cdot 10^{-8}$  Кл;  
 $Q_4 = -4 \cdot 10^{-8}$  Кл;  
 $a = 0,2$  м;  
 $E_{\Sigma} = ?$   $F_{\Sigma} = ?$

Решение. Каждый из зарядов  $Q$  создает в центре квадрата электрическое поле независимо друг от друга. Расстояние от каждого заряда до центра квадрата равно:

$$r = \frac{a\sqrt{2}}{2} = \frac{a}{\sqrt{2}}; \quad r^2 = \frac{a^2}{2}.$$

Первый заряд создает в центре поле с напряженностью:

$$E_1 = \frac{kQ_1}{r^2} = \frac{2kQ_1}{a^2} = 4500 \left( \frac{\text{В}}{\text{м}} \right).$$

Все заряды создают в центре поля с напряженностями, зависящими от зарядов:

$$E_2 = 2E_1; \quad E_3 = 3E_1; \quad E_4 = 4E_1.$$

Изобразим направление и модуль векторов напряженности с учетом знака зарядов (рис. 31).

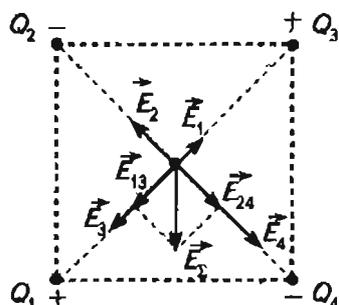


Рис. 31

Поскольку диагонали квадрата перпендикулярны, удобно найти сумму векторов напряженности, складывая сначала попарно напряженности  $\vec{E}_1 + \vec{E}_3$  и  $\vec{E}_2 + \vec{E}_4$ , а затем получившиеся в результате векторы  $\vec{E}_{13}$  и  $\vec{E}_{24}$ . Как видно из рисунка, такое сложение дает  $E_{13} = 2E_1$  и  $E_{24} = 2E_1$ ; модуль суммарного вектора напряженности, как следует из теоремы Пифагора, равен:

$$E_{\Sigma} = \sqrt{8}E_1 \approx 12 \cdot 700 \left( \frac{\text{В}}{\text{м}} \right).$$

Этот вектор направлен вдоль стороны квадрата, соединяющей заряды 2 и 1.

Вектор силы, которая будет действовать на заряд  $q$ , помещенный в центр квадрата, будет иметь то же направление, так как  $q > 0$ .

Модуль силы  $\vec{F}$  равен:

$$F = qE_{\Sigma} = 6,3 \cdot 10^{-4} \text{ (Н)}$$

### Уровень А 49

13. Положительные точечные заряды в 20 и 30 мкКл расположены на расстоянии 0,5 м в воздухе. Найдите напряженность поля на линии, соединяющей эти заряды в точках, удаленных на 0,25 м от одного, от другого и от обоих зарядов?

14. Точечные заряды в  $+2 \cdot 10^{-8}$ ,  $-4 \cdot 10^{-8}$ ,  $+6 \cdot 10^{-8}$  и  $-8 \cdot 10^{-8}$  Кл расположены в вершинах квадрата со стороной в 0,2 м. Рассчитайте напряженность электрического поля в центре этого квад-

рата. Как теперь определить силу, действующую на заряд  $q = 1 \cdot 10^{-8}$  Кл, помещенный в эту точку?

### Уровень Б

15. Точечные заряды в  $+1 \cdot 10^{-8}$ ,  $-2 \cdot 10^{-8}$ ,  $+3 \cdot 10^{-8}$  и  $-4 \cdot 10^{-8}$  Кл расположены в вершинах квадрата  $A, B, C, D$  соответственно. Сторона квадрата 0,2 м. Рассчитайте напряженность электрического поля в середине сторон  $AB$  и  $CD$  квадрата. Куда начнет двигаться положительный заряд, помещенный в эти точки; отрицательный заряд?

16. Рассчитайте направление и модуль вектора напряженности в вершине  $C$  треугольника, если два одноименных (разноименных) заряда по 10 и 20 нКл расположены в вершинах  $A$  и  $B$ . Длины сторон треугольника  $AB, BC$  и  $AC$  равны 30, 40 и 50 см или 50, 50, 50 см, соответственно. Какая сила будет действовать на электрон, если его поместить в вершину  $C$ , и с каким ускорением он начнет двигаться?

Контрольная работа

### Уровень А (рассчитана на 45 мин)

1. На заряд 0,01 Кл действует сила 2 Н. Напряженность поля в этой точке пространства равна...

А.  $0,02 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ .

Б.  $0,005 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ .

В.  $200 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ .

Г.  $0,04 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ .

2. Положительный заряд, подвешенный на нити, отклонился в однородном поле вправо от вертикали. Вектор напряженности поля может быть направлен...

А, вертикально вверх.

Б, вертикально вниз.

В, горизонтально вправо.

Г, горизонтально влево.

3. Два заряда  $2 \cdot 10^{-9}$  Кл и  $-4 \cdot 10^{-9}$  Кл расположены на расстоянии 0,1 м друг от друга, отрицательный правее положительного. Куда направлен вектор напряженности поля в точке, расположенной на линии, соединяющей заряды, на 0,1 м правее отрицательного заряда?

- А. Вправо.  
 Б. Влево.  
 В. Равен 0.  
 Г. Вертикально вверх.

4. Силовая линия электрического поля — это...

- А. линия, вдоль которой в поле будет двигаться положительный заряд.  
 Б. линия, вдоль которой в поле будет двигаться отрицательный заряд.  
 В. светящаяся линия в воздухе, которая видна при большой напряженности поля.  
 Г. линия, в каждой точке которой напряженность поля направлена по касательной.

5. Три равных заряда  $+q$ ,  $+q$  и  $-q$  расположены в вершинах  $K$ ,  $L$  и  $N$  правильного треугольника. Куда направлена напряженность электрического поля в центре треугольника?

- А. В точку  $K$ .  
 Б. В точку  $L$ .  
 В. В точку  $N$ .  
 Г. От точки  $K$  вдоль медианы, проведенной из вершины  $K$ .

6. Два заряда  $2 \cdot 10^{-9}$  Кл и  $-4 \cdot 10^{-9}$  Кл расположены на расстоянии 0,1 м друг от друга, отрицательный правее положительного. Чему равна напряженность электрического поля в точке, лежащей на середине отрезка между этими зарядами?

### Уровень Б (рассчитана на 45 мин)

1. Сила, действующая в точке поля с напряженностью  $100 \frac{\text{В}}{\text{м}}$  на заряд 0,04 Кл равна...

- А. 4 Н.  
 Б. 100,04 Н.  
 В. 2500 Н.  
 Г. 0,0004 Н.

2. Электрон влетает в однородное электрическое поле. Вектор его скорости направлен против вектора напряженности поля. Скорость электрона будет...

- А. уменьшаться.  
 Б. увеличиваться.  
 В. останется неизменной.  
 Г. начнет колебаться.

3. В однородном поле с напряженностью  $200 \frac{\text{В}}{\text{м}}$  в вакууме движется пылинка массой 0,1 мг, несущая заряд 1 нКл. Ускорение пылинки равно...

- А.  $2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .  
 Б.  $20 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .  
 В.  $0,0005 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .  
 Г.  $2 \cdot 10^{18} \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

4. Два заряда  $2 \cdot 10^{-9}$  Кл и  $-4 \cdot 10^{-9}$  Кл расположены на расстоянии 0,1 м друг от друга, отрицательный правее положительного. Где расположена точка на плоскости, в которой напряженность электрического поля, созданного этими зарядами, равна нулю?

5. Три равных заряда  $+q$ ,  $+q$  и  $-q$  расположены в вершинах  $K$ ,  $L$  и  $N$  правильного треугольника.  $q = 2$  нКл. Сторона треугольника 10 см. Куда направлен вектор напряженности  $\vec{E}$  электрического поля в центре треугольника, и каков его модуль?

*Творческие задания*

### Уровень А

1. Проведите исследование происхождения терминов «электрическое поле» и «напряженность электрического поля».

### Уровень Б

2. Используя зависимость напряженности поля от точечного заряда, создающего поле, и принцип суперпозиции полей, проанализируйте картину силовых линий вокруг двух одинаковых зарядов противоположного знака  $+Q$  и  $-Q$ .

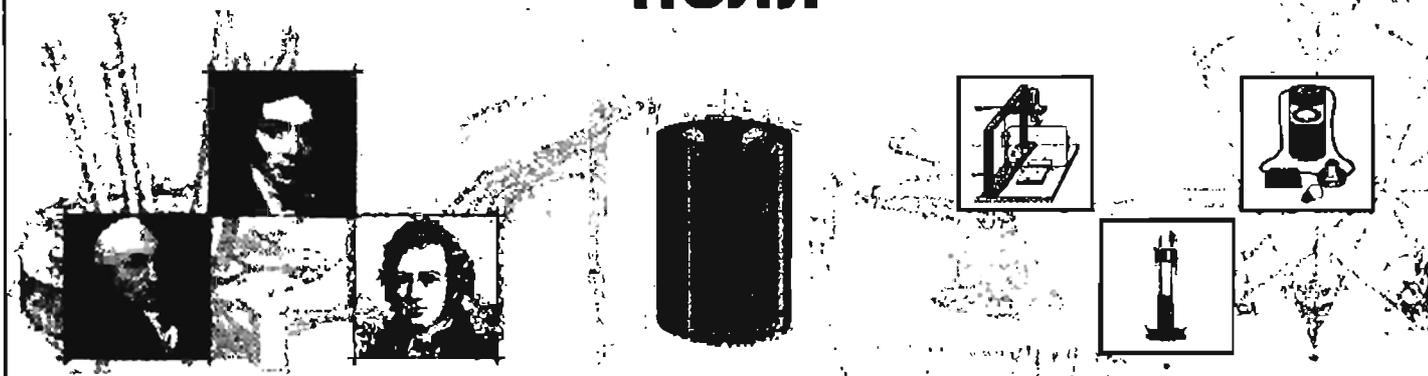
Используя знание картины электрических полей вблизи и внутри металлических тел, проанализируйте установившуюся картину силовых линий в системе точечный заряд  $+Q$  — незаряженное металлическое плоское тело. Что можно сказать о силе взаимодействия заряда  $+Q$  с незаряженной металлической плоскостью? Что можно сказать о зависимости плотности ин-

дуцированного заряда на металлической поверхности от расстояния до основания перпендикуляра, опущенного из точки расположения заряда над плоскостью?

3. Выведите зависимость напряженности поля диполя (скрепленные на расстоянии  $d$  заряды  $+Q$  и  $-Q$ ) от расстояния до центра диполя при  $r \gg d$ .



# Потенциал электрического поля



## Изучив эту тему,

- ♦ вы узнаете об энергетических характеристиках электрического поля: потенциале и разности потенциалов;
- ♦ поймете, как взаимосвязаны силовая и энергетическая характеристики электрического поля;
- ♦ примените свои знания для расчета изменения кинетической энергии частиц, попавших в электрическое поле

## Основные понятия:

Энергия разделенных зарядов ♦ Энергия электрического поля ♦ Работа сил электрического поля ♦ Потенциальная энергия заряда в электрическом поле ♦ Разность потенциалов ♦ Потенциал ♦ Эквипотенциальная поверхность

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

## Энергия разделенных зарядов

Два заряженных при электризации тела притягиваются друг другу и, если им дать возможность двигаться, начнут сближаться. Значит, каждый заряд может подействовать на другой с силой  $F$  и переместить его на расстояние  $s$ , т. е. совершить работу. Следовательно, разделенные заряды обладают запасом энергии.

## Энергия электрического поля

Можно отвлечься от того, что взаимодействуют два заряженных тела и говорить, что один из зарядов находится в электрическом поле, созданном вторым зарядом. Тогда можно сказать о способности этого поля совершить работу, т. е. об энергии поля. Работа электростатического поля по перемещению заряда не зависит от формы траектории и при пе-

перемещении по замкнутому контуру равна 0. Такие поля называются **потенциальными**. Так, в однородном поле (рис. 32) работа при перемещении заряда из точки  $M$  в точку  $K$  и вдоль отрезка  $MK$ , и по ломаной  $MNK$  равна  $Eqd$ , где  $Eq = F$  — сила, действующая на заряд  $q$  в однородном поле напряженности  $E$ ;  $d$  — длина отрезка  $MN$ :

$$A_{MK} = F \cdot MK \cdot \cos \alpha = F \cdot MN = Eq \cdot d;$$

$$A_{MKN} = A_{MN} + A_{NK} = F \cdot MN + 0 = Eq \cdot d.$$

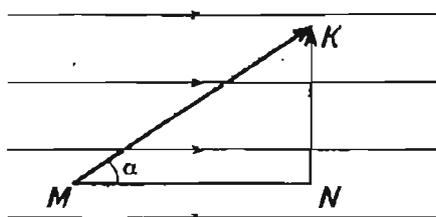


Рис. 32

### Потенциальная энергия заряда в электростатическом поле

В потенциальных полях можно ввести понятие **потенциальной энергии**, т. е. энергии, зависящей только от координаты заряда, помещенного в это поле. Если предположить потенциальную энергию заряда в какой-то точке  $O$  известной ( $W_0$ ), то потенциальная энергия в любой другой точке  $x$  будет равна работе  $A$ , которую совершит поле по перемещению заряда из точки  $x$  в точку  $O$ .

$$W(x) = A + W_0$$

**Потенциал электрического поля в данной точке**  $x$  — это отношение потенциальной энергии положительного пробного заряда в этой точке поля к величине этого заряда.

$$\varphi(x) = \frac{W(x)}{q}$$

Введение понятия потенциала поля возможно благодаря тому, что это отношение не зависит от пробного заряда  $q$ . Для однородного поля эта величина, как следует из вышеизложенного (рис. 32) равна:

$$\varphi = \varphi_0 + Ed,$$

где  $d$  — проекция перемещения  $MN$ . В неоднородном поле всю траекторию можно разбить на участ-

ки, на каждом из которых поле практически однородно, и сложить работы на этих участках.

Потенциал называют **энергетической характеристикой поля** (сравни: напряженность — силовая характеристика поля  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ ). Потенциал — скалярная величина.

Единица измерения потенциала: 1 Вольт =  $\frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}$ .

### Разность потенциалов и работа поля

Работа  $A_{12}$ , совершенная полем по перемещению заряда  $q$  из точки 1 в точку 2, равна:

$$A_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Если поле перемещает положительный заряд из точки с большим потенциалом в точку с меньшим потенциалом, то работа поля положительна, потенциальная энергия  $W_p$  заряда уменьшается, а кинетическая  $W_k$  увеличивается. Величина

$$\Delta\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$$

называется **разностью потенциалов между точками 1 и 2**, и в данном примере она положительна. В зависимости от знаков  $\Delta\varphi_{12}$  и  $q$  работа может быть и положительной и отрицательной.

### Взаимосвязь разности потенциалов и напряженности в однородном поле

В однородном поле  $A_{12} = qEd$  независимо от траектории движения заряда, и в тоже время  $A_{12} = q\Delta\varphi_{12}$ , поэтому:

$$\Delta\varphi_{12} = Ed,$$

где  $d$  — проекция перемещения заряда на силовую линию.

**Потенциал точечного заряда  $Q$**  рассчитывается методами интегрального исчисления:

$$\varphi(r) = \frac{kQ}{\epsilon r} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}.$$

Как видно, он положителен для положительного заряда и убывает с расстоянием по закону  $\frac{1}{r}$  в отличие от напряженности точечного заряда  $\left(E \sim \frac{1}{r^2}\right)$ .

Потенциал точечного заряда на бесконечности равен нулю.

**Потенциал металлического шара и сферы**

При  $r > R$  (радиус шара) потенциал рассчитывается по формуле для точечного заряда (картина полей идентична). При  $r \leq R$  потенциал равен потенциалу на поверхности шара, так как внутри шара работа полей не совершается ( $E = 0$ ).

Потенциал системы  $N$  зарядов равен алгебраической сумме потенциалов полей, создаваемых каждым из зарядов:

$$\varphi_{\Sigma} = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_N.$$

**Эквипотенциальная поверхность** — поверхность, в каждой точке которой потенциал имеет одинаковое значение. Например, поверхность металлического тела. Эквипотенциальные поверхности

перпендикулярны силовым линиям электрического поля, как показано на рис. 33.

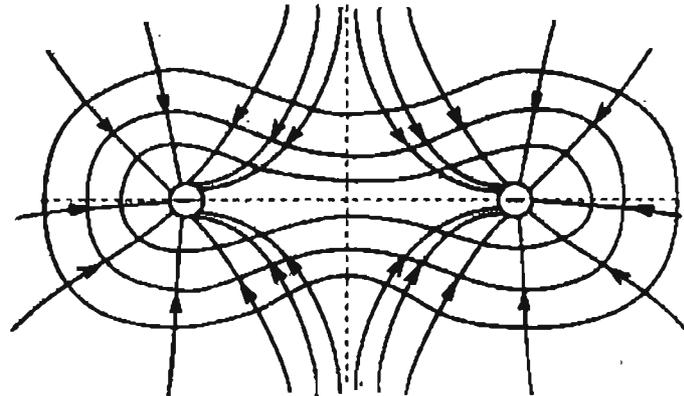


Рис. 33

Законы в виде формул	Обозначения величин, единицы измерения в СИ, справочные значения констант
Потенциал электростатического поля $\varphi_1 = \varphi(1) = \frac{W_p(1)}{q}$	$\varphi_1 = \varphi(1)$ — потенциал поля в точке 1 $W_p(1)$ — потенциальная энергия пробного заряда $q$ в точке 1 поля $q$ — положительный пробный заряд Единица измерения: $1 \text{ Вольт} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}$
Разность потенциалов $\Delta\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ $\Delta\varphi_{12} = \frac{(W_p(1) - W_p(2))}{q}$ $\Delta\varphi_{12} = \frac{A_{12}}{q}$	$\Delta\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ — разность потенциалов между точками 1 и 2 $A_{12}$ — работа поля по перемещению заряда $q$ из точки 1 в точку 2 поля
Однородное поле $\Delta\varphi_{12} = Ed$	$E$ — напряженность однородного поля $d$ — проекция перемещения заряда $q$ из точки 1 в точку 2 поля
Потенциал точечного заряда $\varphi(r) = \frac{kQ}{\epsilon r} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}$ $\varphi(\infty) = 0$ Потенциал проводящего шара и сферы $r \leq R, \varphi(r) = \varphi(R) = \frac{kQ}{\epsilon R} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon R}$ $r > R, \varphi(r) = \frac{kQ}{\epsilon r} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}$	$r$ — расстояние от заряда до точки, в которой определяется потенциал $Q$ — точечный заряд или заряд на шаре $\epsilon$ — диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится заряженное тело $R$ — радиус шара $\varphi_{\Sigma}$ — суммарный потенциал, создаваемый в данной точке системой из $N$ зарядов $\varphi_N$ — потенциал, создаваемый в данной точке зарядом под номером $N$
Потенциал системы $N$ зарядов $\varphi_{\Sigma} = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_N$	

*Лабораторные работы***1. Изучение условия прекращения перемещения свободных зарядов в металлах**

**Цель:** установить экспериментально равенство потенциалов на разных участках проводника после установления электростатического равновесия.

**Оборудование:** электрометр с шарообразным наконечником, пластмассовая палочка и шерстяная ткань для электризации трением, протяженный проводник неправильной формы, соединительные провода, источник высокого напряжения школьный на 5 кВ.

**Ход работы**

1. Укрепите проводник неправильной формы на изолирующем держателе и зарядите его, электризуя палочку.
2. Заземлите корпус электрометра. Потенциал Земли принимают обычно за ноль. Если теперь зарядить центральный стержень электрометра, то потенциал его относительно незаряженного корпуса будет иным. Возникнет электрическое поле между стержнем и корпусом и разность потенциалов между ними. Электрическое поле совершит работу по перемещению центра тяжести стрелки. Поэтому говорят, что с помощью электрометра можно измерять разность потенциалов между телом, присоединенным к корпусу, и телом, присоединенным к центральному стержню.
3. Разрядите электроскоп касанием и с помощью проводника на изолирующей ручке соедините заряженное тело неправильной формы с центральным стержнем электрометра. Вы измеряете разность потенциалов между заряженным телом и Землей. Перемещая соединительный проводник вдоль тела неправильной формы, убедитесь, что потенциал участков тела одинаков относительно потенциала Земли (рис. 34).

Зарисуйте форму заряженного тела и укажите потенциал некоторых точек относительно Земли в условных единицах шкалы электрометра.

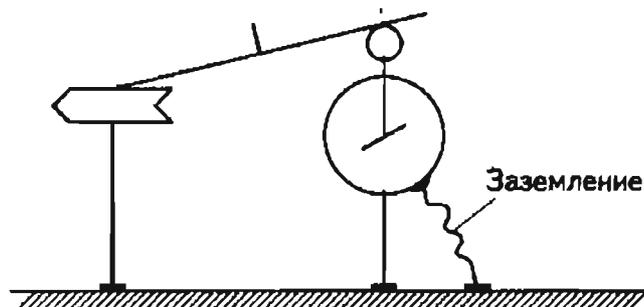


Рис. 34

4. **ВНИМАНИЕ!** Выполнять только под наблюдением учителя! Присоедините проводами выходы школьного источника высокого напряжения к центральному стержню и корпусу электрометра и, подав высокое напряжение, проследите, как заряжается прибор. Зарегистрируйте количество делений электрометра, соответствующее разности потенциалов 5000 В между корпусом и центральным стержнем.
5. Оцените, до какого потенциала по отношению к потенциалу Земли было заряжено тело неправильной формы при выполнении п. 3.
6. (Уровень Б). Наденьте на стержень электрометра шарообразный наконечник и, наэлектризовав пластмассовую палочку, перенесите на шар некоторый заряд. По отклонению стрелки электрометра оцените потенциал шарообразного наконечника и по формуле потенциала сферы оцените заряд на нем.

*Самостоятельные работы***Обучающий тест**

1. Заряд  $+10^{-3}$  Кл под действием сил электростатического поля перемещается из точки 1 в точку 2, при этом поле совершает работу 3 Дж. Разность потенциалов между точками  $\varphi_1 - \varphi_2$  равна...
  - А.  $-3000$ В.
  - Б.  $+3000$ В.
  - В.  $+3 \cdot 10^{-3}$ В.
  - Г.  $+0,33 \cdot 10^{-3}$ В.

2. Шар заряжен положительно. Как соотносятся потенциалы  $\varphi_{10}$  и  $\varphi_{20}$  на расстоянии 10 см от поверхности шара и на расстоянии 20 см от поверхности?

- А.  $\varphi_{10} > \varphi_{20}$ .  
 Б.  $\varphi_{10} < \varphi_{20}$ .  
 В.  $\varphi_{10} = \varphi_{20}$ .  
 Г. ответ зависит от радиуса шара.

3. В однородном поле с напряженностью  $300 \frac{\text{В}}{\text{м}}$  положительный заряд перемещается вдоль линий напряженности на 2 см. Разность потенциалов между точками 1 и 2 равна...

- А. 600 В.  
 Б. 6 В.  
 В. 150 В.  
 Г. 15 000 В.

4. Электрон перемещается под действием сил поля из точки с потенциалом 100 В в точку с потенциалом 200 В. Его скорость при этом...

- А. возрастает.  
 Б. убывает.  
 В. не изменяется.  
 Г. зависит от направления начальной скорости.

5. Модуль потенциала поля точечного заряда при увеличении расстояния от него в 4 раза...

- А. возрастает в 4 раза.  
 Б. возрастает в 16 раз.  
 В. убывает в 4 раза.  
 Г. убывает в 2 раза.

6. Два заряда разного знака создают в одной точке пространства потенциалы +100В и -200В. Потенциал поля, созданного этими двумя зарядами в этой точке равен...

- А. 100В.  
 Б. 300В.  
 В. -50В.  
 Г. -100В.

*Тренировки по  
решению задач*

## Определение потенциала и разности потенциалов

### Пример решения задачи

Протон ( $q = +1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл) перемещается силами поля из точки с потенциалом 10 000 В в точку с потенциалом 5000 В. Какую работу совершило поле? Как изменилась потенциальная энергия протона и как изменилась его кинетическая энергия?

Дано:  $q = +1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;  
 $\varphi_1 = 10000$  В;  
 $\varphi_2 = 5000$  В;  
 $A = ?$   $\Delta E_n = ?$   $\Delta E_k = ?$

Решение. По определению разности потенциалов при перемещении положительного заряда из точки поля с большим потенциалом в точку поля с меньшим потенциалом работа сил поля положительна:

$$A = (\varphi_1 - \varphi_2) q = 5000 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 8 \cdot 10^{-16} \text{ (Дж)}$$

Потенциальная энергия, исходя из определения потенциала, при этом перемещении уменьшится на столько же единиц, а работа сил поля приведет к увеличению кинетической энергии частиц:

$$\Delta E_n = -A = -8 \cdot 10^{-16} \text{ Дж}; \Delta E_k = A = 8 \cdot 10^{-16} \text{ Дж}$$

### Уровень А

1. Заряд  $+1 \cdot 10^{-5}$  Кл помещен в точку поля, потенциал которой равен 2000 В. Какой потенциальной энергией обладает этот заряд?
2. Потенциальная энергия заряда  $-2 \cdot 10^{-6}$  Кл в точке  $M$  электрического поля равна  $4 \cdot 10^{-5}$  Дж. Чему равен потенциал этой точки поля?
3. Заряд, помещенный в точку поля с потенциалом -200 В, обладает потенциальной энергией 5 мДж. Определите модуль и знак этого заряда.
4. При перемещении из точки  $M$  в точку  $N$  электростатического поля заряда в +3 мКл поле совершает работу в 0,15 Дж. Какова разность потенциалов  $\Delta\varphi_{MN}$  между этими точками? Какую работу совершит поле при перемещении этого же заряда из точки  $N$  в точку  $M$ ? Какова разность потенциалов  $\Delta\varphi_{NM}$ ?

5. Разность потенциалов между точками 1 и 2 электростатического поля равна  $\Delta\varphi_{12} = 50$  В. Какую работу совершит поле при перемещении заряда  $+2$  мкКл из точки 1 в точку 2? Какую работу совершит поле, если будет перемещать заряд  $-2$  мкКл?
6. Пылинка ( $q = +2 \cdot 10^{-9}$  Кл) перемещается силами поля из точки с потенциалом 5000 В в точку с потенциалом 1000 В. Какую работу совершило поле? Как изменилась потенциальная энергия пылинки и ее кинетическая энергия?
7. Электрон ( $q = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл) перемещается из точки с потенциалом 10 000 В в точку с потенциалом 5000 В. При этом в начальной точке он имел кинетическую энергию  $10^{-15}$  Дж. Какова его кинетическая энергия в конечной точке?

**Уровень Б**

8. Разность потенциалов между точками 1 и 2 электростатического поля равна  $\Delta\varphi_{12} = 50$  В. Какую работу совершит поле при перемещении заряда  $+2$  мкКл из точки 1 в точку 2? Какую работу совершит человек, если ему придется переносить с постоянной скоростью тот же заряд из точки 1 в точку 2 и наоборот?
9. Электрон перемещается из точки с потенциалом 10 000 В в точку с потенциалом 5000 В. При этом в начальной точке он имел скорость  $5 \cdot 10^7 \frac{м}{с}$ . Какова его скорость в конечной точке?
10. В ускорителе альфа-частица проходит промежуток между ускоряющими электродами с разностью потенциалов между ними 10 кВ. На сколько возросла ее скорость при прохождении от первого электрода до второго, если у первого она имела скорость  $10^5 \frac{м}{с}$ ? Потенциал какого электрода выше?
11. В кинескопе телевизора электроны в вакууме вылетают с раскаленного катода ( $T \approx 2000$  К) и ускоряются, перемещаясь в электростатическом поле между точками с разностью потенциалов 23 кВ. Оцените, во сколько раз возрастает кинетическая энергия электронов, если вблизи катода ее можно считать  $W_{к0} \approx kT$ , где  $k$  — постоянная Больцмана.

**Потенциал поля точечного заряда и шара**

**Пример решения задачи**

Заряд  $Q = +2$  мкКл находится на шаре радиусом  $R = 10$  см, расположенном в керосине ( $\epsilon = 2$ ). Постройте график зависимости потенциала поля, создаваемого этим зарядом, от расстояния  $r$  до точки, в которой находится заряд, в интервале от 0 до 1 м. Используя график, ответьте на вопрос: чему равна потенциальная энергия заряда  $q = +1$  нКл, расположенного в точке  $r = 45$  см?

**Решение.** Как известно, напряженность поля внутри заряженного шара равна 0. Поэтому работа при перемещении пробного заряда из точки внутри шара в бесконечность совершается только с поверхности шара: потенциал точек  $A$  внутри шара постоянен и равен потенциалу точек  $B$  на его поверхности (рис. 35).

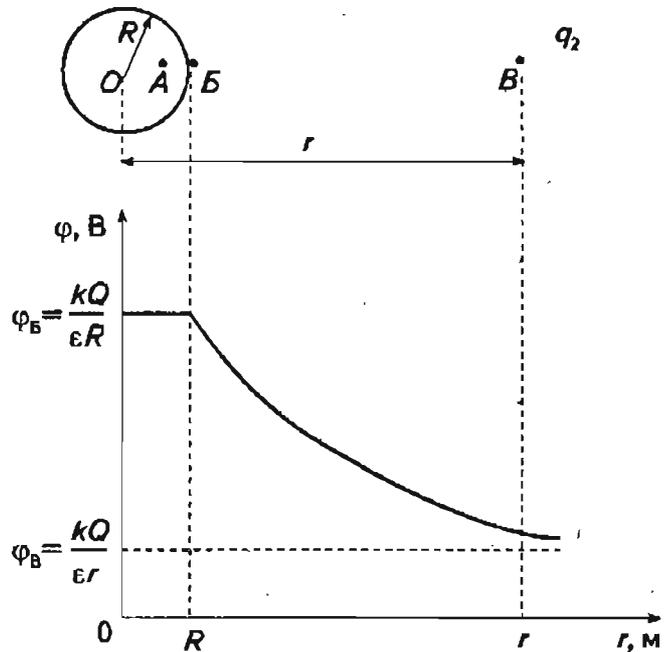


Рис. 35

$$\varphi_A = \varphi_B = \frac{kQ}{\epsilon R}$$

В любой точке  $B$  вне шара на расстоянии  $r$  от его центра потенциал рассчитывается так же, как и для точек поля вокруг точечного заряда:

$$\varphi_B = \frac{kQ}{\epsilon r}$$

Составим для построения графика таблицу.

$r, \text{ м}$	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\varphi, \text{ кВ}$	90	90	45	22,5	15	11,25	9

График приведен на рис. 35. По нему можно определить  $\varphi(0,45 \text{ м}) = 20 \text{ 000 В}$ , что в соответствии с определением потенциала точки электрического поля дает значение потенциальной энергии заряда  $q = 10^{-9} \text{ Кл}$ , помещенного в эту точку поля:

$$W_n(0,45 \text{ м}) = \varphi \cdot q = 2 \cdot 10^{-5} \text{ (Дж)}.$$

### Уровень Б

- Точечный заряд  $Q = +2 \text{ мкКл}$  находится в керосине ( $\epsilon = 2$ ). Постройте график зависимости потенциала поля, создаваемого этим зарядом, от расстояния  $r$  до точки, в которой находится этот заряд, в интервале от 0 до 1 м. Найдите по графику, на сколько потенциал в точке  $r = 25 \text{ см}$  больше потенциала в точке  $r = 35 \text{ см}$ .
- Выполните построение графика по данным из предыдущего задания для  $Q = -2 \text{ мкКл}$ . Где и на сколько в этом случае потенциал поля больше: в точке  $r = 25 \text{ см}$  или в точке  $r = 35 \text{ см}$ ?
- На шаре радиуса  $R = 0,2 \text{ м}$ , расположенном в бензине ( $\epsilon = 2$ ), находится заряд  $Q = +4 \text{ мкКл}$ . Постройте график зависимости потенциала поля, создаваемого этим зарядом, от расстояния  $r$  до точки, в которой находится этот заряд, в интервале от 0 до 1 м. Используя график, ответьте на вопрос: чему равна потенциальная энергия заряда  $q = +1 \text{ нКл}$ , расположенного в точке  $r = 45 \text{ см}$ ?
- Как изменится кинетическая энергия заряда  $q = +2 \text{ нКл}$ , если его внести в вакууме в поле точечного заряда  $Q = +5 \text{ мкКл}$  на расстояние 10 см, отпустить и позволить переместиться на расстояние 1 м от заряда  $Q$ ?
- В закрепленной металлической сфере радиуса  $R = 1 \text{ см}$ , имеющей заряд  $Q = -10 \text{ нКл}$ , проделано малое отверстие. Точечный заряд  $q = 1 \text{ нКл}$ , масса которого равна 1 мкг, движется по прямой, проходящей через центр сферы и отверстие. На большом расстоянии от сферы скорость заряда равна  $v_0 = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Какова скорость заряда внутри сферы?

- На какое минимальное расстояние могут сблизиться два протона при лобовом столкновении в вакууме, если на большом удалении друг от друга они имели скорость по  $10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  каждый?

## Однородное электрическое поле

### Пример решения задачи

Пылинка находится на одной из заряженных плоских пластин, поле между которыми однородно. При отрыве пылинка приобретает некоторый заряд, поле совершает над ней работу, и при подлете к другой пластине она приобретает кинетическую энергию  $5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$ . Каков заряд пылинки и напряженность поля между пластинами, если разность потенциалов между пластинами 1000 В, а расстояние 1 см?

Дано:  $W_k = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$ ;

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U = 1000 \text{ В};$$

$$d = 0,01 \text{ м};$$

$$q = ? \quad E = ?$$

Решение. Найдем напряженность поля между пластинами. Для однородного поля:

$$E = \frac{U}{d} = 100 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}.$$

Изменение кинетической энергии равно изменению потенциальной при перелете пылинки из точки 1 в точку 2:

$$W_k = \Delta W_n = q \cdot \Delta \varphi = q \cdot U \Rightarrow$$

$$q = \frac{W_k}{U} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ (Кл)}.$$

### Уровень А

- Напряженность однородного поля равна  $200 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ . Какую работу проделают силы электрического поля при перемещении заряда  $q = +10^{-7} \text{ Кл}$  вдоль силовых линий поля на расстояние 0,1 м? Какова разность потенциалов между начальной и конечной точкой перемещения? На что будет затрачена работа, если заряд перемещается свободно?
- Между двумя параллельными пластинами создано однородное электрическое поле. Разность потенциалов между пластинами 200 В, расстояние 1 см. Какова напряженность однородного поля?

20. На одной из двух заряженных плоских пластин, поле между которыми однородно, находится пылинка. При отрыве от пластины пылинка приобретает некоторый заряд и начинает двигаться к другой пластине. При подлете к другой пластине она приобретает кинетическую энергию  $6 \cdot 10^{-3}$  Дж. Каков заряд пылинки и напряженность поля между пластинами, если разность потенциалов между пластинами 500 В, а расстояние между ними 2 см?

### Уровень Б

21. Плотность заряда на большой плоской пластине  $\sigma = 10^{-5} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$ . Какова разность потенциалов между точкой на поверхности пластины и точкой, удаленной на 10 см от ее поверхности?
22. Пылинка находится на одной из заряженных плоских пластин, поле между которыми однородно. При отрыве пылинка приобретает некоторый заряд и начинает ускоряться. Разность потенциалов между пластинами 1000 В. Какова масса пылинки, если имея на себе 10 000 избыточных электронов она приобрела скорость  $1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ?
23. Две плоские пластины размером  $20 \times 20$  см разместили параллельно друг другу на расстоянии 0,5 см и зарядили одну зарядом  $+5 \cdot 10^{-6}$  Кл, а другую  $+2 \cdot 10^{-6}$  Кл. Оцените разность потенциалов между ними.

## Потенциал поля нескольких зарядов

### Пример решения задачи

Заряды в 1, 2, 3, 4 нКл закреплены в вершинах квадрата со стороной  $a = 20$  см. Найдите потенциал поля, созданного этими зарядами в центре квадрата (точка А) и на его стороне между зарядами в 3 и 4 нКл (точка В). Что произойдет со скоростью электрона, если, двигаясь по некоторой траектории, он попадет из точки А в точку В? Расположение зарядов представлено на рис. 36.

**Решение.** Рассчитаем потенциал заряда 1 в точке А. Расстояние от заряда до точки А равно

$$\frac{a}{\sqrt{2}} = 0,14 \text{ м, поэтому } \varphi_{1A} = \frac{kq_1}{r_{1A}} = 64 \text{ В.}$$

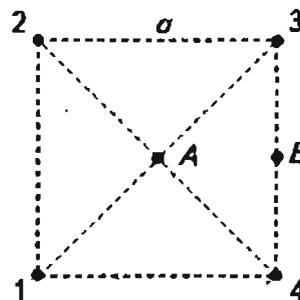


Рис. 36.

Потенциалы поля в точке А, созданные остальными зарядами, равны соответственно 128, 192, 256 В, а суммарный потенциал:

$$\varphi_A = 64 + 128 + 192 + 256 = 640 \text{ (В).}$$

Расстояние от зарядов 1 и 2 до точки В равно:

$$\frac{a\sqrt{5}}{2} = 0,22 \text{ м,}$$

а от зарядов 3 и 4 — 0,1 м.

Потенциалы, созданные зарядами 1, 2, 3, 4 в точке В равны соответственно 41, 82, 270 и 360 В, что дает значение:

$$\varphi_B = 753 \text{ В.}$$

Таким образом, электрон, перемещаясь из точки А в точку В, попадает в точку с большим потенциалом, и так как его заряд отрицателен, то потенциальная энергия его уменьшается (оставаясь отрицательной), а следовательно кинетическая энергия увеличивается.

### Уровень В

24. Заряды в 2, 4, 6, 8 нКл закреплены в вершинах квадрата со стороной  $a = 0,1$  м. Найдите потенциал поля, созданного этими зарядами в центре квадрата (точка А) и на его стороне между зарядами в 6 и 8 нКл (точка В). Что произойдет со скоростью электрона, если, двигаясь по некоторой траектории, он попадет из точки А в точку В?
25. Неподвижные заряды  $Q_1 = 3 \text{ мкКл}$  и  $Q_2 = 5 \text{ мкКл}$  расположены в вершинах квадрата А и В. Какую работу совершат силы электрического поля при перемещении заряда  $q = 10 \text{ нКл}$  из вершины С в вершину D? Сторона квадрата равна 0,5 м.

Контрольная  
работа

## Уровень А (рассчитана на 45 мин)

1. В однородном электростатическом поле положительный заряд перемещается из точки  $M$  в точку  $N$  по трем траекториям: I, II, III (рис. 37). В каком случае совершается большая работа?

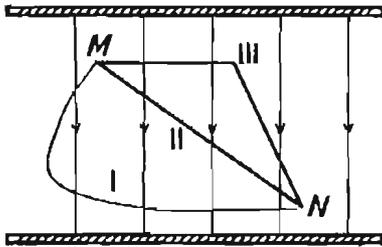


Рис. 37

- А. I.       Б. II.       В. III.  
 Г. Работа одинакова во всех случаях.
2. Два заряда в 1 нКл и 2 нКл перемещаются силами электрического поля из точки 1 в точки 2 и 3 соответственно. При этом совершается одинаковая работа. Что можно сказать о соотношении разности потенциалов между точками 1 и 2 ( $\Delta\phi_{12}$ ) и между точками 1 и 3 ( $\Delta\phi_{13}$ )?
- А.  $\Delta\phi_{12} > \Delta\phi_{13}$ .       Б.  $\Delta\phi_{12} < \Delta\phi_{13}$ .  
 В.  $\Delta\phi_{12} = \Delta\phi_{13}$ .  
 Г. Нельзя сказать определенно, не зная потенциала в точке 1.
3. Положительный заряд перемещается силами поля из точки с большим потенциалом в точку с меньшим потенциалом, при этом его потенциальная и кинетическая энергии...
- А. увеличиваются.  
 Б. уменьшаются.  
 В. потенциальная увеличивается, а кинетическая убывает.  
 Г. кинетическая увеличивается, а потенциальная убывает.
4. Электрон массы  $m$  движется в однородном электростатическом поле из точки 1 в точку 2, увеличивая свою скорость от  $v_1$  до  $v_2$ . Какова разность потенциалов между точками 1 и 2 ( $\Delta\phi_{12}$ ), если заряд электрона  $e$ ?
5. Потенциал поля точечного заряда  $Q$  в точке А, удаленной от  $Q$  на 20 см, равен 120 В. Рассчи-

тайте потенциал поля в точке В, удаленной от  $Q$  на расстояние 30 см.

## Уровень Б (рассчитана на 45 мин)

1. Произведение заряда на потенциал имеет размерность...
- А. силы.       Б. энергии.  
 В. импульса.       Г. напряженности.
2. Покоящийся положительный заряд 0,01 Кл переместился из точки 1 в точку 2 под действием сил поля. При этом его потенциальная энергия уменьшилась на 2 Дж. Разность потенциалов между точками 1 и 2 ( $\Delta\phi_{12}$ ) равна...
- А. +0,02 В.       Б. +0,005 В.  
 В. +200 В.       Г. -200 В.
3. Электрическое поле шара радиуса  $R = 10$  см имеет на расстоянии  $a = 20$  см от поверхности шара потенциал 300 В. Каков потенциал в центре шара?
4. На отрезке в 1 м между зарядами +3 мкКл и -2 мкКл найдите точку пересечения отрезка с эквипотенциальной поверхностью нулевого потенциала.
5. Два точечных заряда создают в точке  $M$  поле, потенциал которого равен 100 В. Если убрать первый заряд, то потенциал точки  $M$  становится равным -200 В. Каков будет потенциал поля в точке  $M$ , если убрать второй заряд, оставив на месте первый?
6. Электрон летит из центра квадрата, в вершинах которого расположены заряды +1 нКл, -1 нКл, +2 нКл и -2 нКл в точку, находящуюся на середине стороны квадрата, содержащей заряды -1 нКл и +2 нКл. Какова скорость электрона в этой точке, если в начальной точке скорость равна  $10^6 \frac{m}{c}$ ? Сторона квадрата 20 см.

Творческие  
задания

## Уровень Б

1. Постройте картину силовых линий и эквипотенциальных поверхностей электрического поля вокруг двух зарядов  $+10^{-8}$  Кл и  $3 \cdot 10^{-8}$  Кл, расположенных на расстоянии 10 см. Можно ли заранее предсказать форму эквипотенциальных поверхностей на расстоянии 1 см и 1 м от каждого из зарядов?



# Работа по разделению зарядов. ЭДС

## Изучив эту тему,

- ♦ вы узнаете об устройствах, в которых разные виды энергии преобразуются в энергию разделенных зарядов (электроэнергию);
- ♦ поймете, что в физике некоторые термины похожи по звучанию, но означают разные величины;
- ♦ сможете практически создавать источники тока из подручных средств.

## Основные понятия:

Работа по разделению зарядов ♦ Источники тока ♦  
Электродвижущая сила

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

Электрическое поле, возникающее вокруг одних заряженных тел, может совершить механическую работу по перемещению других заряженных тел. Однако для создания заряженных тел сторонними силами необходимо совершить работу по разделению зарядов. Это мы видели на примере электризации трением. В процессе работы сторонних сил происходит разделение положительных и отрицательных зарядов, содержащихся в электрически нейтральных атомах. Разделение зарядов технически реализуется в различных устройствах, называемых источниками тока.

Источники тока выводят на две клеммы избыток положительных и отрицательных зарядов. Соединение этих клемм проводником может привести к перемещению зарядов (электронов) по проводнику от клеммы «-» к клемме «+», т. е. к протеканию тока по цепи. В источнике тока они соединяются с ионами противоположного знака, и затем источник тока опять совершает работу по разделению зарядов за счет сторонних сил. Присоединение к клеммам отдельных проводящих электричество предметов приводит к их зарядке и взаимному притяжению. Правда, вследствие малости зарядов на

присоединенных к источнику тока телах, такое притяжение не всегда удается наблюдать экспериментально.

**Источники тока** подразделяются на несколько видов в зависимости от физических принципов, положенных в основу процесса разделения зарядов. Такими процессами могут быть электризация трением (*электрофорная машина*), химические реакции (*гальванические элементы и аккумуляторы*), деформация кристаллов (*пьезоэлементы*), нагрев контакта тел из разных материалов (*термопара*), освещение кристаллов или стыков полупроводниковых материалов (*солнечные элементы*), перемещение рамки из проводника относительно магнита (*динамомашинка, или генератор переменного тока*). В каждом источнике происходит преобразование того или иного вида энергии в энергию разделенных зарядов или энергию электрического поля.

**Электродвижущая сила (ЭДС)** источника тока — это исторически сложившийся термин, *не имеющий отношения к понятию «сила» из курса механики*. Он характеризует способность источника тока «двигать» электрические заряды по проводнику, который присоединен к клеммам источника тока. ЭДС ( $\mathcal{E}$ ) — это отношение работы  $A$ , которую совершает источник при разделении заряда  $q$ , к величине этого заряда.

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q}$$

ЭДС измеряется в вольтах ( $1\text{В} = \frac{1\text{Дж}}{1\text{К}}$ ), как и разность потенциалов, и показывает, какую работу совершил источник тока при подаче на клеммы «+» и «-» заряда +1 Кл и -1 Кл, какую потенциальную энергию он им сообщил, сколько энергии может теперь высвободиться при преобразовании энергии разделенных зарядов в другие виды энергии.

**Водно-механическая аналогия ЭДС** становится особенно наглядной при рассмотрении химического источника тока, созданного итальянским исследователем Вольта, развившим идеи Гальвани, обнаружившего явление возникновения электрического разряда при контакте пары разных металлов с мышечной тканью лягушки. Этот источник получил название «вольтова столба» и представляет собой чередующиеся пластинки серебра (меди), цинка (олова) и картона, пропитанного раствором поваренной соли (рис. 38).

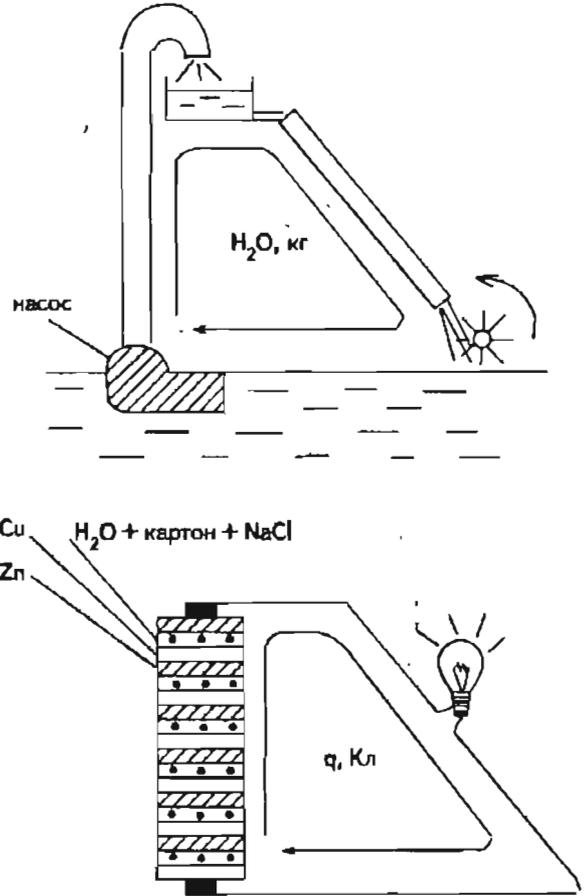


Рис.38

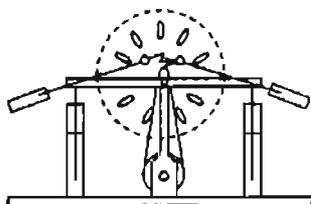
Если принять аналогии: количество воды — заряд, источник тока — насос, ЭДС — потенциальная энергия воды, то понятны аналогии насоса и источника тока, увеличивающих потенциальную энергию системы. Чем мощнее насос, тем на большую высоту он поднимет 1 кг воды, чем больше ЭДС (т. е. чем выше «вольтов столб»), тем большую энергию он сообщит 1 Кл разделенных зарядов.

Законы в виде формул	Обозначения величин, единицы измерения в СИ, справочные значения констант
$\mathcal{E} = \frac{A}{q}$	<p><math>\mathcal{E}</math> — электродвижущая сила источника тока                      Единица измерения 1 Вольт = <math>\frac{1\text{Дж}}{1\text{К}}</math></p> <p><math>A</math> — работа, совершенная источником при разделении заряда  <math>q</math> — заряд</p>

**Виды источников тока**

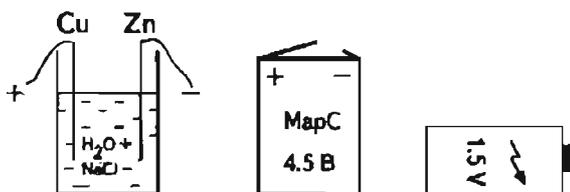
**Принцип действия и использование**

**Электрофорная машина**



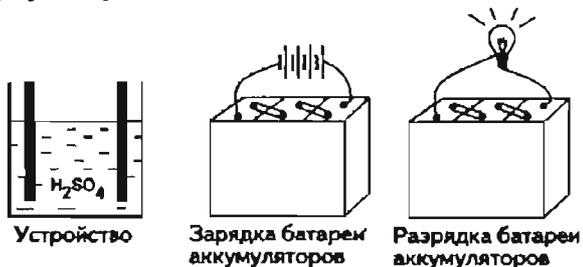
Механическое вращение непроводящих дисков с нанесенными проводящими участками, часть которых на одном из дисков электризуется трением, приводит к накоплению зарядов в специальных устройствах, называемых «лейденскими банками». В настоящее время используется в основном для демонстрации опытов, требующих контролируемого генерирования больших (до десятков тысяч вольт) ЭДС

**Гальванический элемент**



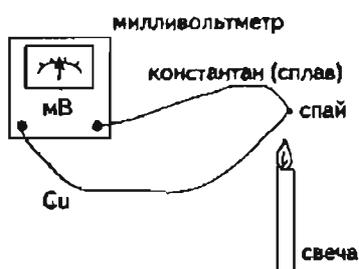
Два разных материала погружаются в раствор или другую проводящую среду и за счет необратимых химических реакций, идущих на границе раствор — твердое тело, происходит накопление электронов или заряженных ионов на электродах. В них происходит необратимое превращение энергии химических связей, накопленной при синтезе этих веществ, в энергию разделенных зарядов

**Аккумулятор**



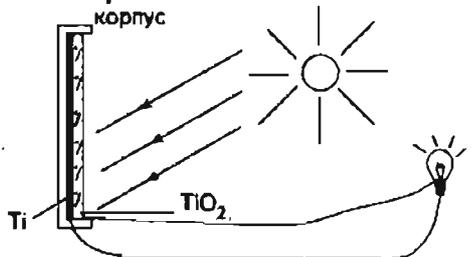
Материал электродов и растворитель подбираются такими, чтобы химические реакции, идущие на границе электрод — растворитель, были обратимы, т. е. могли идти преобразование энергии разделенных зарядов при зарядке аккумулятора от другого источника электроэнергии в энергию химических связей и последующая разрядка аккумулятора

**Термопара**

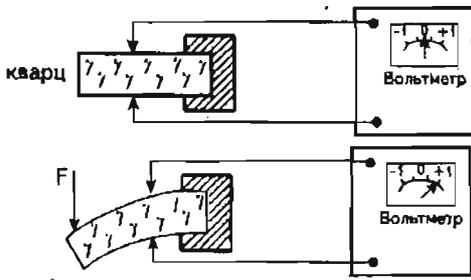
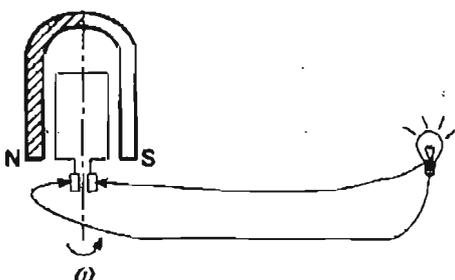


При нагреве спая двух разных металлов происходит перемещение электронов с одного металла на другой. Таким образом, внутренняя энергия преобразуется непосредственно в энергию разделенных зарядов. Измеряя ЭДС, можно определять температуру (термопарные термометры)

**Солнечная батарея**



При освещении некоторых полупроводниковых материалов в контакте с металлами происходит смещение электронов с металла на полупроводник. Используются для непосредственного преобразования энергии солнечного света в электрическую (космические станции, блоки питания калькуляторов и т. п.)

Виды источников тока	Принцип действия и использование
<p><b>Пьезоэлемент</b></p> 	<p>При механической деформации некоторых кристаллов (кварц) происходит перемещение электронов из одной области кристалла в другую. Использовались для преобразования механических колебаний (звука) в энергию колебаний заряда (микрофон, патефон). Сейчас в быту используются в пьезозажигалках для газовых плит</p>
<p><b>Генератор переменного тока</b></p> 	<p>При вращении рамки из проводника около магнита или магнита около рамки, в рамке происходит перемещение электронов по проводнику. Таким образом механическая энергия преобразуется в электрическую. Основной метод выработки электроэнергии на электростанциях. Также используется в генераторах транспортных средств (автомобилях), и т. д.</p>

### Лабораторные работы

#### 1. Сборка и испытание гальванических элементов

**Цель:** собрать из доступных материалов источник тока, ЭДС которого была бы достаточной для загорания лампы накаливания.

**Оборудование и материалы:** поваренная соль, вода, стаканы, сырая картофелина, соленый огурец, медные и цинковые пластины (из набора по электролизу) или куски оцинкованной жести и медная фольга или монеты, угольные стержни (из набора по электролизу) или графитовые стержни от простых карандашей, вольтметр или амперметр, лампочка накаливания на 1 – 2,5 В, соединительные провода.

#### Ход работы

1. Все методы создания разности потенциалов на клеммах того или иного химического источника тока основаны на том, что при приведении в контакт разных материалов, электроны частично перемещаются с одного материала на другой. Регистрация этого факта для разных пар материалов требует более или менее чувствительного способа. Выберите несколько способов реги-

страции, чтобы понять, какой из них более чувствителен.

- а) Язык при соприкосновении с двумя клеммами электрической батарейки на 3–4 В почувствует «кислинку» и отдернется. Сокращение мышц препарированной лягушки под действием электрического разряда позволило Гальвани впервые зарегистрировать факт возникновения электрического тока. Отсюда и происходит название «гальванические элементы».
- б) Специальные приборы, стрелки которых отклоняются при протекании через них электрического заряда при присоединении к клеммам источника тока. В зависимости от предназначения они бывают очень чувствительными (микровольтметр или микроамперметр) и довольно грубыми (с ценой деления 100 В).
- в) Лампа накаливания, которая при протекании через нее заряда, светится за счет разогревания нити. Это наиболее привычный в быту способ определения работы источника электроэнергии.

- г) Электронная схема калькулятора с табло на жидких кристаллах.
- 2. Приготовьте несколько стеклянных, пластмассовых или керамических стаканчиков с раствором поваренной соли в воде (2–3 г соли на 100 г воды).
- 3. Приготовьте несколько электродов из разных материалов, зачистив концы проводов от лаковой изоляции ножницами и прикрепив эти концы к пластинам из стали, меди, цинка, олова, угля (графита). Если у вас имеется школьный набор по электролизу, то закрепите пластины из разных материалов в винтовой зажим крышки стакана для электролиза (рис. 39 а).
- 4. Если работаете с подручными средствами, то надо внимательно следить за наличием контактов в местах соединения различных элементов установки (лучше, где можно, припаять провода). Тонкие графитовые стержни от карандашей лучше скрепить в один плотный пучок и к нему прикрепить провод (рис. 39 б).

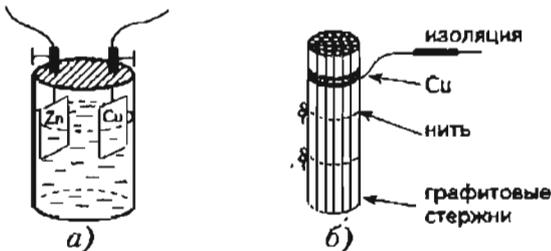


Рис.39

- 5. Проверьте, возникает ли ЭДС при опускании в стакан с раствором соли электродов из одинакового материала, а затем пары из различных материалов. Если имеется гальванометр или вольтметр, то измерьте ЭДС и определите полярность на клеммах. Меняя пары электродов, заполните таблицу.

Электроды	Напряжение на электродах, В	Полярность на клеммах (+)
Уголь (графит) — уголь		
Медь — медь		
Медь — уголь		
Цинк — медь		
Сталь — медь		
.....		
Цинк — уголь		

- 6. Устройте батарею из гальванических элементов, соединяя последовательно плюс одного элемента с минусом другого, как показано на рис. 40.

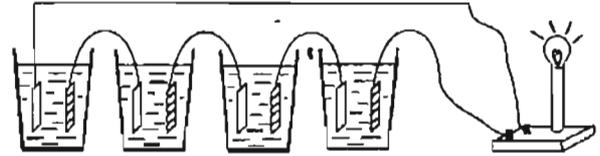


Рис. 40

Вольта утверждал, что соединив 30–40 стаканчиков и опустив пальцы в крайние из них можно получить ощутимый «электрический удар» — сильное сокращение мышц. Вам достаточно соединить 2–3 элемента, чтобы получить ЭДС, достаточную для загорания лампочки. Собрав такую батарею, измерьте ЭДС этого источника.

- 7. Исследуйте, зависят ли ЭДС батарей и накал лампы от площади электродов, погруженных в раствор, и от концентрации соли в растворе.
- 8. Выбрав наиболее чувствительный метод определения наличия ЭДС на клеммах, попробуйте изготовить гальванический элемент из соленого огурца и медного и цинкового электродов; из картофелины и железного гвоздя и меди в качестве электродов (рис. 41).

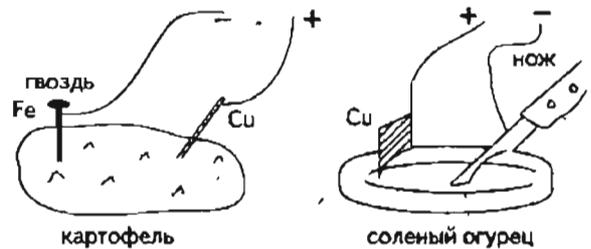


Рис. 41.

Можно ли такими элементами раскалить нить лампы? Использовать их в калькуляторе?

- 9. Сделайте выводы из проведенной работы.
  - ЭДС вырабатывается при опускании в раствор электродов из \_\_\_\_\_ материалов.
  - Максимальную ЭДС удалось получить при использовании пары электродов из \_\_\_\_\_ . При этом «+»

вырабатывается на электроде из \_\_\_\_\_

- Возникающая ЭДС (зависит, не зависит) от площади погружения электродов в раствор.
- ЭДС источника тока (зависит, не зависит) от концентрации соли в растворе.
- Лампа, рассчитанная на \_\_\_\_\_ В, засветилась при использовании батареи из \_\_\_\_\_ элементов, на основе электродов из \_\_\_\_\_

*Самостоятельная  
работа*

### Обучающий тест

1. Электродвижущая сила источника тока измеряется в...
  - А. Ньютонах.
  - Б. Джоулях.
  - В. Вольтах.
  - Г. Амперах.
2. С помощью источника тока можно...
  - I. обеспечить движение зарядов через проводник, присоединенный к его клеммам.
  - II. зарядить два тела зарядом противоположного знака и увидеть что они притягиваются.
 Какое из этих утверждений верно?
  - А. Только I.
  - Б. Только II.
  - В. И I, и II.
  - Г. Ни I, ни II.
3. ЭДС источника — это ...
  - А. сила,двигающая заряды.
  - Б. работа сторонних сил по разделению зарядов.
  - В. отношение работы сил по разделению зарядов к величине разделенных зарядов.
  - Г. произведение работы сторонних сил по разделению зарядов на заряд.

4. В гальваническом элементе происходит ...

- А. преобразование энергии разделенных зарядов в энергию связи химических соединений.
- Б. преобразование химической энергии в энергию разделенных зарядов.
- В. выработка электроэнергии с использованием энергии света.
- Г. преобразование механической энергии в энергию разделенных зарядов.

5. Преобразование механической энергии в энергию разделенных зарядов может осуществляться в...

- I. электрогенераторе автомобиля.
  - II. пьезоэлементе электрозажигалки для газовых плит.
  - III. электрофорной машине.
- А. Верно только I.
  - Б. Верно I и II.
  - В. Верно I и III.
  - Г. Верно и I, и II, и III.

6. Энергию разделенных зарядов можно преобразовать в...

- I. световую.
  - II. внутреннюю.
  - III. механическую.
- А. Верно только I.
  - Б. Верно только II.
  - В. Верно только III.
  - Г. Верно I, II, III.

7. При разделении заряда в 3 Кл сторонние силы производят в источнике тока работу в 150 Дж. Какова ЭДС на клеммах источника?

- А. 450 В.
- Б. 50 В.
- В. 25 В.
- Г. 0,02 В.

*Контрольная  
работа*

1. Источник тока с ЭДС 12 В питает лампы. Какую работу совершили сторонние силы, если через лампу протек заряд в 2 Кл?
2. Если в раствор NaCl в воде опустить два пористых угольных электрода и на 1–2 минуты присоединить их к батарейке, то видно, что на угольных электродах начинают выделяться газы: на одном хлор, на другом — водород. Если теперь отключить батарейку и присоединить к угольным электродам лампу, то она некоторое время горит, постепенно уменьшая накал. Как работает такой газовый аккумулятор электроэнергии? Что находится в растворе после того, как лампа перестала светить? Какие виды преобразования энергии происходят в описанных процессах?

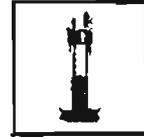
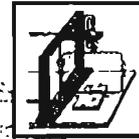
3. Приведите примеры устройств, в которых энергия разделенных зарядов возникает за счет преобразования механической и световой энергии.

*Творческие  
задания*

1. Подготовьте доклад о получении большой разности потенциалов в устройствах, проводящих разделение зарядов при перемещении одних движущихся частей относительно других, и сравните их эффективность.
2. Подготовьте доклад об истории открытия «животного» электричества Гальвани и устройстве современных гальванических элементов.
3. Подготовьте доклад об использовании солнечных батарей в космосе и на Земле.



# Конденсатор. Энергия электрического поля



## Изучив эту тему,

- ♦ вы узнаете, что конденсатор — это устройство, в котором создается однородное электрическое поле и запасается электроэнергия;
- ♦ поймете, как работает фотовспышка и как рассчитывают распределение зарядов на обкладках конденсаторов, соединенных различными способами;
- ♦ сможете своими руками изготовить плоский конденсатор и рассчитать его емкость

## Основные понятия:

Конденсатор ♦ Плоский конденсатор ♦ Емкость плоского конденсатора ♦ Напряженность поля между обкладками конденсатора ♦ Энергия конденсатора ♦ Энергия поля между обкладками конденсатора

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

**Конденсатор** — система двух проводников (обкладок), разделенных слоем диэлектрика. Служит для накопления (конденсации) разделенных зарядов, получаемых тем или иным способом.

**Плоский конденсатор** — две плоские металлические пластины, расположенные параллельно и разделенные слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами пластин. Обозначение конденсатора на электрических схемах соответствует его принципиальному устройству.

## Напряженность поля плоского конденсатора

Обычно рассматривают конденсатор, на обкладках которого расположены одинаковые заряды  $+Q$  и  $-Q$ . Каждая пластина имеет площадь  $S$ , следовательно плотность заряда на ней  $\sigma = \frac{Q}{S}$ . Каждая из пластин создает по обе стороны от себя поле напряженности  $E_1 = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$ .

Как видно из рис. 42, вследствие разноименности зарядов на двух пластинах, поля вне обкладок конденсатора взаимно компенсируются, а в пространстве между обкладками складываются.

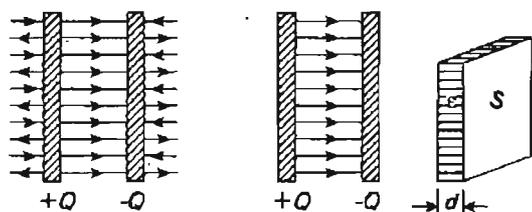


Рис. 42

Таким образом, поле плоского конденсатора является однородным, сосредоточено между обкладками, и его напряженность равна:  $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$ .

Если пространство между обкладками заполнено диэлектриком, то

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon \epsilon_0} = \frac{Q}{S \epsilon \epsilon_0} = \frac{4\pi \sigma k}{\epsilon}$$

где  $k = \frac{1}{4\pi \epsilon_0}$ .

Разность потенциалов между обкладками  $\Delta\phi$  часто называют напряжением и обозначают  $U$  (не путать с напряженностью поля  $\vec{E}$ ).

Так как поле между пластинами конденсатора однородно, напряженность поля конденсатора и напряжение (разность потенциалов) связаны соотношением

$$U = E \cdot d,$$

где  $d$  — расстояние между обкладками.

### Емкость конденсатора

Термин сохранился со времен, когда электрический заряд считался невесомой жидкостью. *Емкость показывает, как много заряда может «натечь» в конденсатор, подключенный к источнику, разделяющему заряды.* Если это источник тока с ЭДС равной  $\mathcal{E}$ , то при соединении конденсатора и источника тока по схеме, показанной на рис. 43, течение заряда прекратится, когда напряжение на обкладках станет равно  $U = \mathcal{E}$ .

Коэффициент пропорциональности между зарядом  $Q$  на конденсаторе и разностью потенциалов  $U$  на его обкладках и называется емкостью конденсатора  $C$ :

$$Q = C \cdot U$$

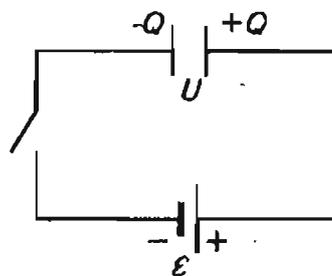


Рис. 43

Введение такого коэффициента пропорциональности имеет смысл только в том случае, если отношение  $C = \frac{Q}{U}$  не зависит от заряда на обкладках конденсатора и разности потенциалов на них.

Легко видеть, что эта величина зависит только от площади пластин  $S$ , расстояния между ними  $d$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  среды, заполняющей пространство между обкладками. Действительно,

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q}{E d} = \frac{Q \epsilon \epsilon_0 S}{Q d} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$$

Таким образом, заряд на обкладках конденсатора (рис. 43) тем больше, чем больше ЭДС источника, к которому он подсоединен, и чем больше емкость этого конденсатора.

Единица измерения емкости:

$$1 \text{ фарада} = 1 \text{ Ф} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}$$

Емкость реальных конденсаторов гораздо меньше, и для ее измерения обычно используют более мелкие единицы: 1 микрофарада (мкФ), 1 нанофарада (нФ), 1 пикофарада (пФ).



Единица электрической емкости названа в честь великого английского ученого Майкла Фарадея (1781 — 1867).

Он исследовал законы протекания тока через растворы и химические реакции, происходящие на электродах (законы электролиза), открыл явление электромагнитной индукции и исследовал его закономерности. Труды Фарадея лежат в основе принципов работы генераторов электростанций и, следовательно, определяют весь облик современной цивилизации.

## Емкость батарей конденсаторов

Эквивалентной емкостью батареи конденсаторов называют такую емкость  $C_{\text{общ}}$ , которая при подключении к тому же источнику тока принимает на себя такой же заряд, что и батарея конденсаторов.

Два конденсатора соединены параллельно, если обкладки обоих попарно соединены друг с другом (рис. 44 а), и последовательно, если обкладка одного соединена с обкладкой другого, а вторые обкладки присоединены к другим участкам цепи (рис. 44 б).

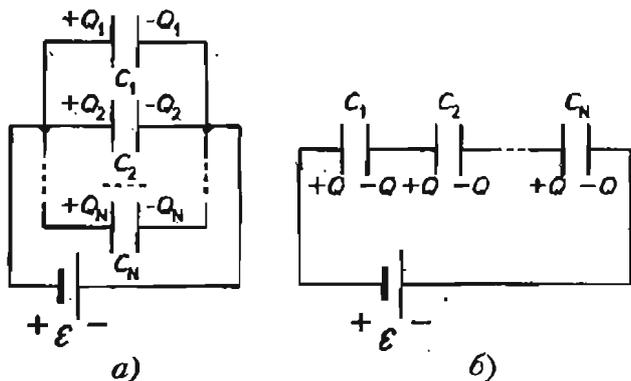


Рис. 44

У параллельно соединенных конденсаторов (рис. 44 а) емкости и заряды складываются:

$$\begin{aligned} C_{\text{общ}} &= C_1 + C_2 + \dots + C_N; \\ Q_{\text{общ}} &= Q_1 + Q_2 + \dots + Q_N; \\ U_1 &= U_2 = \dots = U_N. \end{aligned}$$

Для последовательно соединенных конденсаторов (рис. 44 б):

$$\begin{aligned} U_{\text{общ}} &= U_1 + U_2 + \dots + U_N; \\ Q_1 &= Q_2 = \dots = Q_N; \\ \frac{1}{C_{\text{общ}}} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}. \end{aligned}$$

## Энергия конденсатора

Поскольку при зарядке конденсатора в нем скапливаются разделенные заряды, можно говорить об энергии разделенных зарядов в конденсаторе, или энергии электрического поля, сосредоточенного между обкладками конденсатора.

$$W_C = \frac{CU^2}{2} = \frac{Q^2}{2C}$$

Эта энергия может быть высвобождена, если обкладки заряженного конденсатора соединить, например, через лампу накаливания. После того как все заряды противоположного знака, скопленные на обкладках, протекут через спираль лампочки и прорекомбинируют, лампочка погаснет. Энергия конденсатора перейдет во внутреннюю и световую энергию.

## Конденсатор как техническое устройство

Емкость конденсатора, образованного пластинами 10 см × 10 см, разведенными в воздухе на расстояние 1 мм, составит менее  $10^{-10}$  Ф. Для увеличения емкости радиотехнические конденсаторы изготавливают в виде двух слоев алюминиевой фольги, проложенных промасленной бумагой (диэлектрик) и скрученных в многослойную пачку, упакованную в прочный корпус (рис. 45).

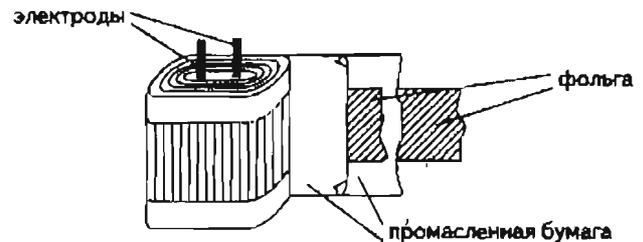
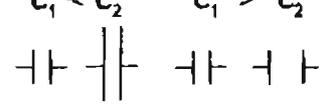


Рис. 45

Важной характеристикой конденсатора является максимальное напряжение  $U_{\text{макс}}$ , указанное на корпусе, при котором он сохраняет работоспособность. При больших напряжениях диэлектрик, проложенный между обкладками, пробивается, и обкладки замыкаются накоротко, составляя единый проводник. При данных габаритах конденсатора, чем больше предельное напряжение, тем меньше емкость. В так называемых электролитических конденсаторах важно при подключении соблюдать указанную полярность, иначе возможен выход прибора из строя и даже разрыв корпуса.

## Использование конденсаторов

Конденсаторы используются в радиотехнике (излучение и прием электромагнитных волн, преобразование электромагнитных колебаний); в устройствах, где нужно медленно накопить большую энергию, а затем ее быстро высвободить (фото вспышка, импульсный лазер).

Законь в виде формул	Обозначения величин, единицы измерения с СИ, справочные значения констант
<p>Напряженность поля между обкладками плоского конденсатора</p> $E = \frac{Q}{S \cdot \epsilon \epsilon_0}$ $E = \frac{U}{d}$ <p>Електроемкость плоского конденсатора</p> $C = \frac{Q}{U}$ $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 \cdot S}{d}$	<p><math>Q</math> — модуль заряда на одной из обкладок  <math>S</math> — площадь одной обкладки  <math>\epsilon</math> — диэлектрическая проницаемость материала, заполняющего пространство между обкладками  <math>\epsilon_0</math> — электрическая постоянная</p> $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} =$ $= 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$ <p><math>U</math> — напряжение или разность потенциалов между обкладками  <math>d</math> — расстояние между обкладками</p> <p>Единица измерения: <math>1 \text{ Ф} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}</math></p>
<b>Свойства конденсаторов</b>	
$C_1 < C_2$ $C_1 > C_2$  $S_1 < S_2$ $d_1 < d_2$	<p>Энергия конденсатора</p> $W_C = \frac{CU^2}{2} = \frac{Q^2}{2C}$
<b>Електроемкость батареи <math>C_{\Sigma}</math> из <math>N</math> конденсаторов</b>	
<p>Параллельное соединение:</p> $C_{\Sigma} = C_1 + C_2 + \dots + C_N$	<p>Последовательное соединение</p> $\frac{1}{C_{\Sigma}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}$

*Лабораторные работы*

**1. Сборка плоского конденсатора и расчет его емкости**

Цель: Ознакомиться с устройством конденсатора, провести расчета электроемкости собранного конденсатора.

Оборудование: лист оргстекла 20 см × 20 см (или толстого полиэтилена с равным по размеру листом картона или фанеры), алюминиевая фольга

такого же размера, ножницы, соединительные провода, источник тока, вольтметр, миллиамперметр (или гальванометр), линейка, штангенциркуль, лабораторный держатель с лапками, зажимы (скрепки или прищепки бельевые).

Ход работы

1. Измерьте с помощью штангенциркуля или микрометра толщину диэлектрика (листа оргстекла или полиэтилена).

2. Вырежьте из алюминиевой фольги две обкладки конденсатора в виде прямоугольников с отходящими от них контактами, как показано на рис. 46. Измерьте и запишите размеры обкладок.



Рис. 46

3. Обкладки из фольги помещают на слой диэлектрика и закрепляют пластмассовыми зажимами. Если вы работаете с мягкими листами полиэтилена и куском картона, то положите на картон лист полиэтилена, на него первую обкладку, затем второй кусок полиэтилена и вторую обкладку, затем для надежности третий кусок полиэтилена. Контакты должны выступать из под полиэтилена, но при этом не выходить за края картона.
4. Найдите в справочных таблицах диэлектрическую проницаемость оргстекла (3,7) или полиэтилена (2,3). Рассчитайте емкость  $C$  собранного конденсатора.
5. Можно зарядить конденсатор эбонитовой палочкой, потертой о шерсть (клемма «-»), и стеклянной палочкой, потертой о шелк, и попытаться убедиться, что микроамперметр регистрирует протекание заряда при присоединении его к обкладкам конденсатора с противоположными знаками. Однако, скорее всего, емкость вашего конденсатора будет так мала, что накопленный заряд будет трудно зарегистрировать приборами, имеющимися в школьной лаборатории.

Действительно, если заряд, который вам удалось накопить на конденсаторе при его зарядке электризованными палочками, будет равен  $10^{-5}$  Кл, то напряжение на конденсаторе составило ( $U = \frac{Q}{C}$ ) около 100 000 В! Однако даже такой заряд, протекая за 1 с через амперметр, создаст трудно регистрируемый ток около 10 мкА.

6. На «полиэтиленовом» конденсаторе можно смоделировать процесс уменьшения габаритов конденсатора, наматывая всю гибкую конструкцию (полиэтилен-фольга-полиэтилен-фольга-полиэтилен) на деревянный карандаш.

Скрепленный нитками, такой «конденсатор» с приклеенной биркой, на которой указана емкость, вполне может служить отчетом о проведенной практической работе.

7. Можно попросить у учителя промышленный конденсатор на 1000 мкФ и, зарядив его от источника с ЭДС 5 В, заставить вспыхнуть неоновую лампу, что убедит вас в накоплении в конденсаторе значительной порции электроэнергии.

В ы в о д ы .

Длина обкладки: \_\_\_\_\_ см.

Ширина обкладки: \_\_\_\_\_ см.

Площадь обкладки: \_\_\_\_\_ м<sup>2</sup>.

Расстояние между обкладками (толщина диэлектрика): \_\_\_\_\_ м.

Диэлектрическая проницаемость диэлектрика: \_\_\_\_\_

Емкость конденсатора: \_\_\_\_\_ = \_\_\_\_\_ мкФ =  
= \_\_\_\_\_ нФ = \_\_\_\_\_ пФ.

Заряд на конденсаторе при зарядке от источника тока с ЭДС \_\_\_\_\_ В равен \_\_\_\_\_ Кл.

*Самостоятельная работа*

### Обучающий тест

#### Уровень А

1. Заряд на обкладках конденсатора увеличили в 4 раза. Как изменится электрическая емкость конденсатора?

- А. Не изменится.  
 Б. Увеличится в 2 раза.  
 В. Увеличится в 4 раза.  
 Г. Уменьшится в 4 раза.

2. Конденсатор один раз подключают к источнику тока с ЭДС 20 В, другой раз с ЭДС 40 В. Как соотносятся заряды  $Q_1$  и  $Q_2$ , накопившиеся на обкладке конденсатора, подключаемой к поло-

жительной клемме источника в первый раз и во второй?

- А.  $Q_1 = Q_2$ .       Б.  $Q_1 = \frac{Q_2}{2}$ .
- В.  $Q_1 = 2Q_2$ .       Г.  $Q_1 = \frac{Q_2}{4}$ .

3. Электрический заряд на одной пластине конденсатора равен  $+2$  Кл, на другой  $-(-2)$  Кл. Напряжение между пластинами равно  $5000$  В. Чему равна электрическая емкость конденсатора?

- А.  $0$  Ф.       Б.  $0,0004$  Ф.
- В.  $0,0008$  Ф.       Г.  $2500$  Ф.

4. Как изменится емкость плоского конденсатора, если площадь пластин увеличить в  $3$  раза?

- А. Не изменится.
- Б. Увеличится в  $3$  раза.
- В. Уменьшится в  $3$  раза.
- Г. Среди ответов А–В нет правильного.

5. Плоский конденсатор подключен к источнику постоянного тока. Как изменится заряд на обкладках, если, не отключая конденсатор от источника, раздвинуть пластины на расстояние, в  $2$  раза превышающее прежнее?

- А. Уменьшится в  $2$  раза.
- Б. Увеличится в  $2$  раза.
- В. Не изменится.
- Г. Зависит от скорости раздвижения.

6. Конденсатор емкости  $2$  мкФ зарядили от источника с ЭДС, равной  $1000$  В. Энергия, запасенная в конденсаторе, равна...

- А.  $2000$  Дж.       Б.  $2$  Дж.
- В.  $1$  Дж.       Г.  $0$  Дж.

### Уровень Б

1. Напряжение на обкладках конденсатора увеличивают в  $2$  раза. Напряженность электрического поля между обкладками...

- А. увеличится в  $2$  раза.
- Б. уменьшится в  $2$  раза.
- В. увеличится в  $4$  раза.
- Г. не изменится.

2. Как изменится емкость воздушного конденсатора, если и расстояние между пластинами и площадь пластин увеличить в  $2$  раза?

- А. Увеличится в  $4$  раза.
- Б. Уменьшится в  $4$  раза.
- В. Увеличится в  $2$  раза.
- Г. Не изменится.

3. Воздушный конденсатор зарядили от источника тока и отсоединили от него. Затем раздвинули пластины, увеличив расстояние между ними в  $2$  раза. Что произошло с зарядом и напряжением между обкладками при раздвижении?

- А. Заряд и напряжения не изменились.
- Б. Заряд не изменился, напряжение увеличилось в  $2$  раза.
- В. Заряд увеличился в  $2$  раза, напряжение не изменилось.
- Г. Заряд не изменился, напряжение уменьшилось в  $2$  раза.

4. Воздушный конденсатор присоединили к источнику тока и, не отсоединяя от него, свели пластины на расстояние в два раза меньшее. Что стало с энергией, запасенной в конденсаторе?

- А. Увеличилась в  $2$  раза.
- Б. Уменьшилась в  $2$  раза.
- В. Увеличилась в  $4$  раза.
- Г. Не изменилась.

5. Два конденсатора емкости  $C$  соединяют последовательно. Емкость такой батареи конденсаторов равна.

- А.  $0$ .       Б.  $\frac{C}{2}$ .
- В.  $C$ .       Г.  $2C$ .

6. Пластины заряженного конденсатора, отсоединенного от источника тока, притягиваются с силой  $F$ . Чему станет равна сила притяжения между его пластинами, если внести в конденсатор пластинку из диэлектрика с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2$ ?

- А.  $\frac{F}{2}$ .       Б.  $F$ .
- В.  $2F$ .
- Г. Среди ответов А–В нет правильного.

*Практикум по  
решению задач*

## Определение емкости конденсатора. Движение частиц в конденсаторе

### Пример решения задачи

Напряженность поля между пластинами конденсатора равна  $200 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ , расстояние между пластинами равно 1 см (рис. 47). Какая сила действует на протон, попавший в пространство между пластинами конденсатора, и куда она направлена? Какую работу совершит эта сила при перемещении протона от положительно заряженной обкладки до отрицательно заряженной? Чему равна разность потенциалов между обкладками конденсатора?

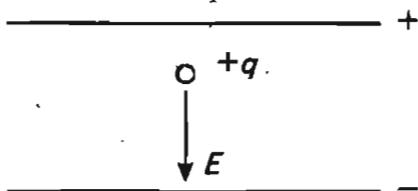


Рис. 47

Дано:  $E = 200 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ ;  
 $d = 1 \text{ см} = 0,01 \text{ м}$ ;  
 $q = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ ;  
 $F = ?$   $A = ?$   $U = ?$

Решение. Поскольку протон обладает положительным зарядом, сила  $\vec{F}$ , действующая на него, будет направлена так же, как и  $\vec{E}$ .

Модуль силы  $F = Eq = 200 \frac{\text{В}}{\text{м}} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} = 3,2 \cdot 10^{-17} \text{ Н}$ .

Работа этой силы положительна, так как направление перемещения совпадает с направлением силы.

$A = Fd = Eqd = 200 \frac{\text{В}}{\text{м}} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 0,01 \text{ м} = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

Разность потенциалов по определению равна:

$$U = \frac{A}{q} = \frac{3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = 2 \text{ В}.$$

Поскольку поле между пластинами однородно, можно эту же величину найти по-другому:

$$U = Ed = 200 \frac{\text{В}}{\text{м}} \cdot 0,01 \text{ м} = 2 \text{ В}.$$

Ответ:  $F = 3,2 \cdot 10^{-17} \text{ Н}$ ;  $A = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ;  $U = 2 \text{ В}$ .

### Уровень А

1. Напряженность поля между пластинами конденсатора равна  $100 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ , расстояние между пластинами равно 2 см. С какой силой действует электрическое поле на заряженную ( $q = +5 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}$ ) капельку масла, попавшую в пространство между пластинами конденсатора, и куда эта сила направлена? Какую работу совершит эта сила при перемещении капли от положительно заряженной обкладки до отрицательно заряженной? Чему равна разность потенциалов между обкладками конденсатора?
2. Емкость конденсатора 200 мкФ, заряд на пластинах 0,005 Кл. Каково напряжение на обкладках?
3. Конденсатор 0,5 мкФ зарядили от источника тока с ЭДС 4В. Каков заряд на каждой из пластин конденсатора?
4. При размещении на пластинах конденсатора зарядов  $-0,0002 \text{ Кл}$  и  $+0,0002 \text{ Кл}$ , разность потенциалов между пластинами оказалась равной 200 В. Какова емкость этого конденсатора?
5. С каким ускорением будет двигаться пылинка в зазоре  $d$  между пластинами конденсатора, заряженного до напряжения  $U$ , если заряд ее равен  $q$ , а масса  $m$ ?

### Уровень Б

#### Пример решения задачи

Протон со скоростью  $10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  влетает в электрическое поле конденсатора вблизи одной из его пластин, параллельно стороне пластины. Длина стороны пластины 5 см, расстояние между пластинами 5 мм (рис. 48). При какой минимальной разности потенциалов протон упадет на противоположную пластину? Силу тяжести не учитывать, поле по всей траектории полета считать однородным.

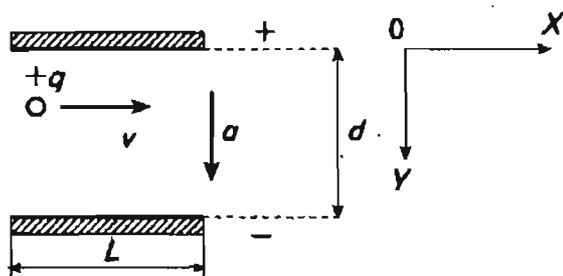


Рис. 48

Дано:  $m_p = 1,6 \cdot 10^{-27}$  кг;  
 $q = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;  
 $v = 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;  
 $L = 5 \text{ см} = 0,05 \text{ м}$ ;  
 $d = 5 \text{ мм} = 0,005 \text{ м}$ ;  
 $U_{\text{min}} - ?$

Решение. Поскольку поле между обкладками конденсатора можно считать однородным, то на заряд на протяжении всего полета будет действовать постоянная сила:

$$F = Eq = \frac{Uq}{d}$$

Она сообщит протону с массой  $m_p$ , ускорение  $a$ , направленное вдоль оси Y (рис. 48):

$$a = \frac{F}{m_p} = \frac{Uq}{dm_p}$$

Движение вдоль оси X является равномерным со скоростью  $v$ , поэтому время пролета частицы от одного края конденсатора до другого равно:

$$t = \frac{L}{v}$$

За это время частица, двигаясь вдоль оси Y равноускоренно, продвинется на расстояние:

$$\Delta y = \frac{at^2}{2} = \frac{UqL^2}{2dm_p v^2}$$

Если  $U$  будет таким, что  $\Delta y = d$ , то частица, пролетев расстояние  $L$ , упадет на нижнюю пластину конденсатора.

$$d = \frac{U_{\text{min}} q L^2}{2 dm_p v^2}$$

$$U_{\text{min}} = \frac{d^2 m_p v^2}{q L^2} = \frac{(0,005)^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-27} \cdot (10^7)^2}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (0,05)^2} = 10\,000 \text{ (В)} = 10 \text{ (кВ)}$$

Ответ:  $U_{\text{min}} = 10 \text{ кВ}$ .

- Разность потенциалов между пластинами плоского конденсатора равна 200 В, расстояние между обкладками 5 мм, пространство между обкладками заполнено слюдой с диэлектрической проницаемостью среды, равной 6, размер обкладок 0,5 м<sup>2</sup>. Чему равна напряженность поля между обкладками и заряд на пластинах конденсатора?
- Электрон со скоростью  $10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  влетает в электрическое поле конденсатора вблизи одной из пластин. Длина стороны пластины 5 см, расстояние между пластинами 5 мм. При какой минимальной разности потенциалов электрон упадет на положительно заряженную пластину. Силу тяжести не учитывать, поле по всей траектории полета считать однородным.
- Электрон в электронно-лучевой трубке разгоняется горизонтально между ускоряющими электродами и попадает в пространство между параллельно расположенными пластинами конденсатора (управляющие электроды). После пролета вдоль обкладок этого конденсатора расстояние в 5 см вектор скорости электрона отклонился от горизонтали на 30°. Какова разность потенциалов между ускоряющими электродами, если напряжение между управляющими электродами 500 В, а расстояние между пластинами 0,5 см?

## Энергия конденсатора

### Пример решения задачи

Конденсатор фотовспышки заряжается от батарейки 6 В. При вспышке выделяется  $9 \cdot 10^{-4}$  Дж световой энергии, что составляет 10% от энергии, запасенной в конденсаторе. Какова емкость конденсатора фотовспышки?

Дано:  $U = 6 \text{ В}$ ;  
 $W_{\text{свет}} = 9 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$ ;  
 $\eta = 10\% = 0,1$ ;  
 $C = ?$

Решение. Энергия, запасенная в конденсаторе, равна  $W_c = \frac{CU^2}{2}$ . Энергия, выделяемая при вспышке, равна:  $W_{\text{свет}} = \eta W_c = \frac{\eta CU^2}{2}$ . Поэтому:

$$C = \frac{2W_{\text{свет}}}{\eta U^2} = \frac{2 \cdot 9 \cdot 10^{-4}}{0,1 \cdot 6^2} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ (Ф)}.$$

Ответ:  $C = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}$ .

### Уровень А

- Какая энергия запасена в конденсаторе, если его зарядили от источника с ЭДС 3 В, а на корпусе его имеется надпись 5 мкФ? Как доказать, что в конденсаторе есть запас энергии?
- Конденсатор фотовспышки имеет емкость 1000 мкФ и заряжается от батарейки 6 В. Рассчитайте световую энергию, выделяющуюся при вспышке, если известно, что она составляет 10% от энергии, запасенной в конденсаторе?
- Две плоских металлических пластины закреплены в воздухе на таком расстоянии, что емкость образовавшегося конденсатора составляет  $10^{-9}$  Ф. Электризуя стеклянную и эбонитовую палочки трением, на пластины наносят соответственно положительный и отрицательный заряды по 5 мкКл. Какова разность потенциалов на пластинах и запас энергии в таком конденсаторе? В виде чего запасена энергия в этом конденсаторе?

### Уровень Б

#### Пример решения задачи

Как изменится энергия, запасенная в конденсаторе, если пластины его раздвигать на удвоенное расстояние, не отсоединяя их от источника тока (рис. 49)? Куда расходуется энергия, запасенная в конденсаторе, и энергия, затраченная человеком на раздвигание противоположно заряженных пластин?

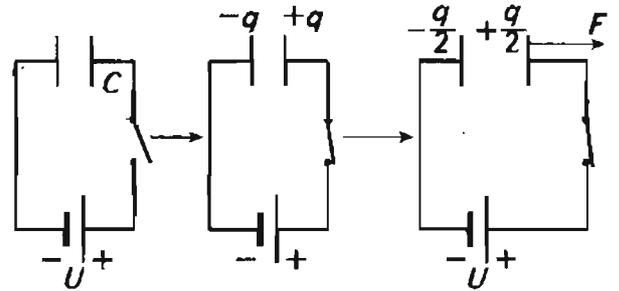


Рис. 49

Решение. При оттягивании одной пластины конденсатора от другой без отсоединения их от источника тока в ходе процесса постоянным остается не заряд, а разность потенциалов на обкладках конденсатора, равная ЭДС источника  $U$ . Поскольку емкость конденсатора  $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$  обратно пропорциональна расстоянию между обкладками  $d$ , то при раздвигании емкость уменьшится от  $C$  до  $\frac{C}{2}$ , уменьшится и энергия от  $W_{1c} = \frac{CU^2}{2}$  до  $W_{2c} = \frac{CU^2}{4}$ , т. е. энергия, запасенная в конденсаторе, уменьшится на  $\Delta W_c = \frac{CU^2}{4}$ .

При этом ясно, что человек, раздвигающий пластины, заряженные зарядами противоположного знака, затрачивает (т. е. вкладывает в систему) энергию. Эта энергия равна работе силы  $F$ , движущей заряд в однородном электрическом поле, создаваемом второй пластиной (его напряженность в 2 раза меньше, чем напряженность поля между пластинами конденсатора). Однако в ходе раздвигания пластин заряд на пластинах ( $CU$ ) уменьшается вследствие уменьшения емкости  $C$ . Расчет требует рассмотрения всех этих факторов.

Куда же расходуется энергия, которая была запасена в конденсаторе, и энергия, затраченная человеком при раздвигании пластин? Поскольку заряд на положительно заряженной пластине был  $CU$ , а стал  $\frac{CU}{2}$ , то ясно, что она пошла на перемещение заряда  $\frac{CU}{2}$  через источник тока, где пришлось совершить работу против сторонних сил источника, равную произведению протекшего заряда на ЭДС источника, то есть  $\frac{CU^2}{2}$ . Другими словами, сторонние силы совершили отрицательную работу:

$$A_v = -\frac{CU^2}{2}$$

Это привело к переводу энергии разделенных зарядов и механической работы, совершенной силой растягивающей пластины, в химическую энергию аккумулятора, если источником тока служит аккумулятор.

Это позволяет, используя закон сохранения энергии, рассчитать работу силы  $F$  при перемещении пластины на расстояние  $d$ :

$$A_F = \frac{CU^2}{2} - \frac{CU^2}{4} = \frac{CU^2}{4}$$

Такое же решение можно получить, рассчитывая работу силы  $F$  по перемещению на расстояние от  $d$  до  $2d$  заряда, меняющегося от  $CU$  до  $\frac{CU}{2}$  в переменном поле второй пластины. Для этого надо владеть методами интегрирования.

Ответ:  $\Delta W_c = \frac{CU^2}{4}$ . Энергия расходуется на увеличение энергии источника тока.

12. При каком соотношении емкостей два конденсатора, один из которых заряжен до 200 В, а второй несет на пластинах заряд 0,2 Кл, обладают одинаковым запасом энергии?

13. Во сколько раз отличаются энергии двух конденсаторов, у которых расстояние между обкладками  $d_1 > d_2$ , если:

- а) они заряжены до одинаковой разности потенциалов;
- б) они заряжены так, что одинаковы заряды на их обкладках?

14. Воздушный конденсатор емкости  $C$  заряжают от аккумулятора с ЭДС равной  $U$ , а затем отсоединяют от источника. Как изменится энергия, запасенная в конденсаторе при раздвигании пластин с удвоением расстояния между ними (рис. 50)? Откуда берется дополнительный запас энергии поля (разделенных зарядов)?

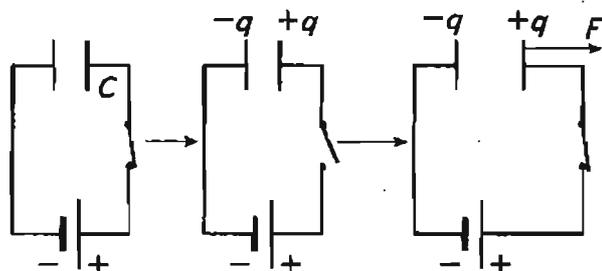


Рис. 50

15. В зазоре между горизонтально расположенными пластинами конденсатора емкости  $C$  находится непроводящая пластина с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , заполняющая все пространство между обкладками. Конденсатор заряжают от источника тока с ЭДС равной  $U$ , а затем отсоединяют от источника. Какую работу нужно совершить, чтобы вынуть диэлектрик из зазора между пластинами?

16. Два конденсатора емкости 1 мкФ и 2 мкФ заряжены до разности потенциалов 200 В и отсоединены от источника тока. Как изменится энергия, запасенная в конденсаторах, если соединить попарно положительно заряженные и отрицательно заряженные пластины конденсаторов (замкнуть ключи  $K_1$  и  $K_2$  на рис. 51). Куда она расходуется?

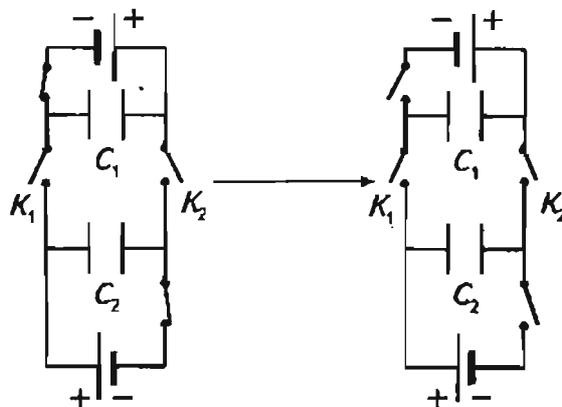


Рис. 51

## Батареи конденсаторов

### Уровень В

#### Пример решения задачи

Рассчитайте заряды и напряжения на каждом из конденсаторов, а также разность потенциалов между точками 1 и 2 (рис. 52). Величины  $C$  и  $U$  считать известными. Какой заряд протечет через ключ  $K$ , если его замкнуть?

**Решение.** Рассчитаем распределение зарядов на конденсаторах при разомкнутом ключе  $K$ . Пронумеруем конденсаторы в соответствии с их емкостями  $C_1 = C, C_2 = 2C, C_3 = 3C, C_4 = 4C$ . Тогда заряды на них будут  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$ , а разности потенциалов на обкладках  $U_1, U_2, U_3, U_4$  соответственно.

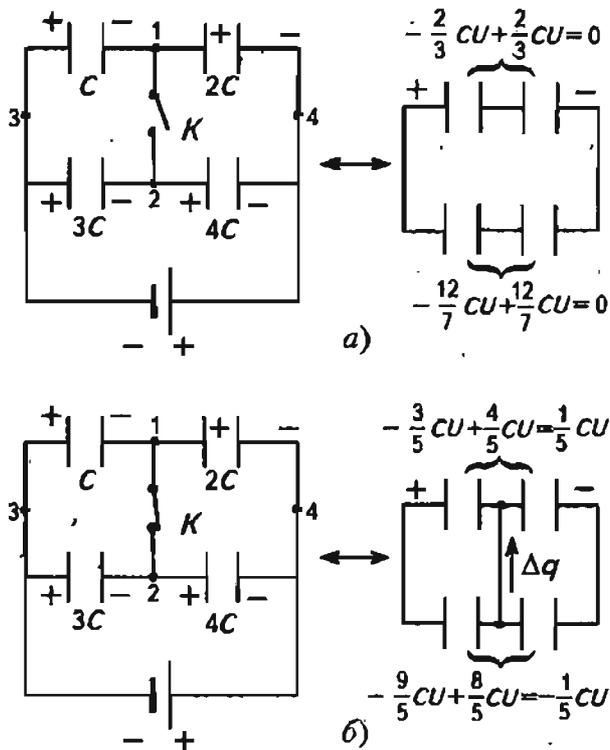


Рис. 52

На основании закона сохранения зарядов, на обкладках конденсаторов 1 и 3 будет такой же суммарный заряд, что и на 2 и 4:

$$Q_1 + Q_3 = Q_2 + Q_4 \quad (1)$$

Кроме того, заряды на «висящих в воздухе» обкладках конденсаторов 3 и 4 будут равны по модулю и противоположны по знаку, так как до их подключения в цепь заряд на них равнялся нулю:

$$Q_3 = Q_4 \quad (2)$$

Поскольку для разностей потенциалов между точками 1, 2, 3, 4 схемы верны соотношения

$$U = \varphi_3 - \varphi_4 = (\varphi_3 - \varphi_1) + (\varphi_1 - \varphi_4) = U_1 + U_2,$$

а  $U_1 = \frac{Q_1}{C_1}$ ,  $U_2 = \frac{Q_2}{C_2}$ , то:

$$U = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} \quad (3)$$

Аналогично:

$$U = \frac{Q_3}{C_3} + \frac{Q_4}{C_4} \quad (4)$$

Уравнения (1) – (4) образуют систему с 4 неизвестными, которая легко решается:

$$Q_1 = Q_2 = \frac{2CU}{3};$$

$$Q_3 = Q_4 = \frac{12CU}{7}.$$

Откуда легко получаем:

$$U_1 = \frac{2U}{3}, U_2 = \frac{U}{3}, U_3 = \frac{4U}{7}, U_4 = \frac{3U}{7}.$$

Для нахождения разности потенциалов между точками 1 и 2 достаточно вычесть уравнения:

$$\varphi_3 - \varphi_1 = U_1;$$

$$\varphi_3 - \varphi_2 = U_2;$$

что дает:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U_2 - U_1 = \frac{U}{3} - \frac{2U}{3} = -\frac{U}{3}.$$

Рассчитаем распределение зарядов на конденсаторах после замыкания ключа  $K$ . В этом случае конденсаторы 1 и 3, а также 2 и 4 попарно соединены параллельно, а два параллельных участка соединены последовательно. Проведя рассуждения, сходные с вышеприведенными, получаем:

$$q_1 + q_3 = q_2 + q_4 \quad (5)$$

$$U'_1 = U'_3 \quad \text{или}$$

$$\frac{q_1}{C_1} = \frac{q_3}{C_3} \quad (6)$$

$$U'_2 = U'_4 \quad \text{или}$$

$$\frac{q_2}{C_2} = \frac{q_4}{C_4} \quad (7)$$

$$U'_1 + U'_2 = U \quad \text{или}$$

$$\frac{q_1}{C_1} + \frac{q_2}{C_2} = U \quad (8)$$

Решение системы уравнений (5) – (8) с учетом соотношений  $C_1 = C$ ;  $C_2 = 2C$  и т. д. дает:

$$q_1 = \frac{3CU}{5}; q_2 = \frac{4CU}{5}; q_3 = \frac{9CU}{5}; q_4 = \frac{8CU}{5}.$$

Если теперь нарисовать заряды с учетом знаков на всех конденсаторах до и после замыкания ключа  $K$ , то становится понятно, что после замыкания ключа по нему перетекает заряд, равный:

$$(+q_2) + (-q_1) = \frac{CU}{5}.$$

Вспомним, что до замыкания ключа  $K$  на внутренних обкладках конденсаторов 1 и 2, как и на внутренних обкладках 3–4, суммарный заряд равнялся

нулю. Поэтому суммарный заряд на внутренних обкладках («висящих в воздухе») всех четырех конденсаторов должен остаться равным 0.

Можно провести решение задачи, используя формулы для емкости эквивалентных конденсаторов, помня, что на обкладках эквивалентного конденсатора собирается такой же заряд, как на крайних обкладках всех крайних конденсаторов.

Ответ: До замыкания ключа заряды и напряжения на конденсаторах равны:

$$Q_1 = Q_2 = \frac{2CU}{3}; \quad Q_3 = Q_4 = \frac{12CU}{7};$$

$$Q_1 = \frac{2U}{3}; \quad Q_2 = \frac{U}{3};$$

$$Q_3 = \frac{4U}{7}; \quad Q_4 = \frac{3U}{7}.$$

При замыкании ключа по нему протечет заряд  $\Delta q = \frac{CU}{5}$ .

**Пример решения задачи**

Рассчитайте емкость конденсатора с диэлектрической пластиной  $\epsilon$ , если без нее емкость конденсатора была  $C$  (рис. 53).

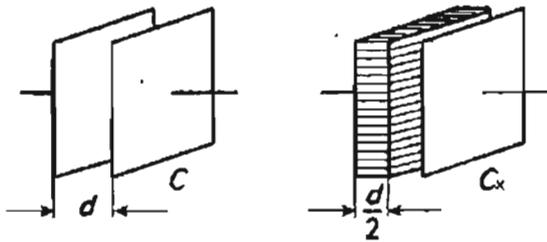


Рис. 53

Решение.

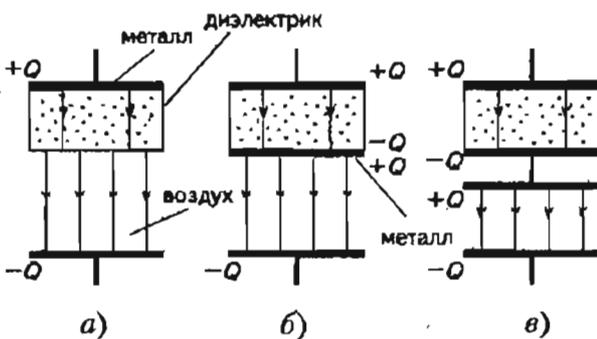


Рис. 54

Как видно из рис. 54 а, поле в разных частях конденсатора отличается только значением напряженности (в части, заполненной диэлектриком, поле в  $\epsilon$  раз слабее). Понятно, что разность потенциалов между точками, лежащими на границе раздела воздух-диэлектрик, и точками одной из обкладок — величина постоянная, т. е. поверхность диэлектрика на границе раздела — эквипотенциальная. Если напылить на нее тонкий слой металла, который тоже является эквипотенциальной поверхностью, то картина полей внутри конденсатора не изменится, только за счет поляризации на разных поверхностях металла возникнут заряды, равные зарядам на обкладках, так как внутри металла поле равно нулю (рис. 54 б). Теперь понятно следующее эквивалентное преобразование: разрыв тонкого слоя металла и получение из одного конденсатора двух, соединенных последовательно (рис. 54 в). Если диэлектрик занимает половину пространства конденсатора, то емкость воздушного конденсатора будет равна:

$$C_1 = 2C,$$

а емкость заполненного диэлектриком:

$$C_2 = 2\epsilon C.$$

Тогда полная емкость равна емкости батареи конденсаторов, соединенных последовательно:

$$\frac{1}{C_x} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{(\epsilon+1)}{2\epsilon C} \Rightarrow C_x = \frac{2\epsilon C}{(\epsilon+1)}.$$

Заметим, что при заполнении верхней половины пространства между обкладками диэлектриком можно свести конденсатор к двум параллельно соединенным конденсаторам.

Ответ: емкость нового конденсатора равна  $\frac{2\epsilon C}{(\epsilon+1)}$ .

17. Конденсаторы емкостью  $C_1 = 1$  мкФ,  $C_2 = 2$  мкФ и  $C_3 = 3$  мкФ соединены параллельно друг другу и включены в цепь источника тока с ЭДС 12 В. Каков заряд на каждом из конденсаторов? Каким одним конденсатором можно заменить эти три конденсатора, чтобы на нем был такой же заряд, что и на данной батарее конденсаторов?

18. Конденсаторы емкостью  $C_1 = 1$  мкФ,  $C_2 = 2$  мкФ и  $C_3 = 3$  мкФ соединены последовательно и присоединены к источнику с ЭДС 12 В. Учитывая, что источник подает разделенные заря-

ды  $+Q$  и  $-Q$  только на крайние пластины конденсаторов  $C_1$  и  $C_3$ , а соединенные пластины конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ ,  $C_2$  и  $C_3$  остаются электрически нейтральными системами, покажите на схеме, представленной на рис. 55, распределение зарядов на всех пластинах трех конденсаторов. Как соотносятся разности потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2 = U_1$ ;  $\varphi_2 - \varphi_3 = U_2$ ;  $\varphi_3 - \varphi_4 = U_3$  на конденсаторах с ЭДС источника  $\mathcal{E} = \varphi_1 - \varphi_4$ ? Рассчитайте заряд на пластинах и напряжение на каждом из конденсаторов.

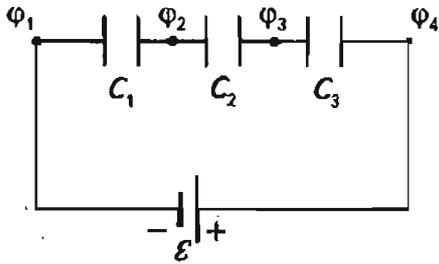


Рис. 55

19. Рассчитайте емкость конденсатора, эквивалентного батарее конденсаторов, изображенной на рис. 56.

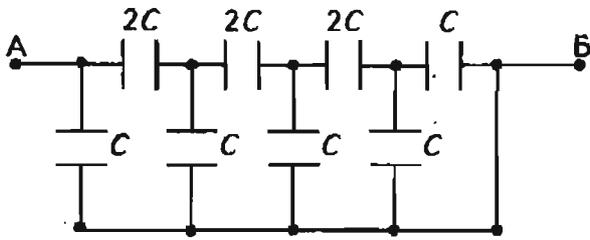


Рис. 56

20. Рассчитайте емкость батареи конденсаторов, показанной на рис. 57.

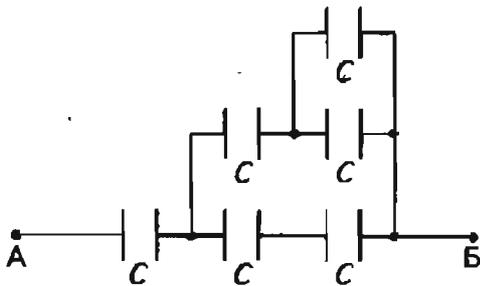


Рис. 57

21. Рассчитайте емкость батареи конденсаторов, представленной на рис. 58.

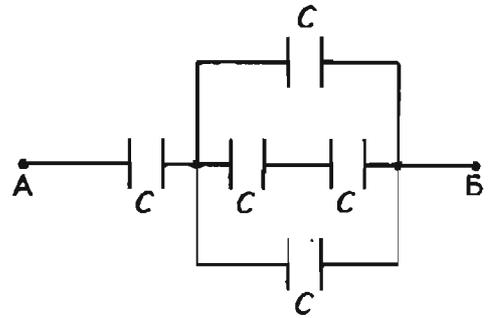


Рис. 58

22. Рассчитайте емкость конденсатора  $C_x$  с диэлектрической пластиной  $\epsilon$ , если без нее емкость конденсатора была  $C$  (рис. 59).

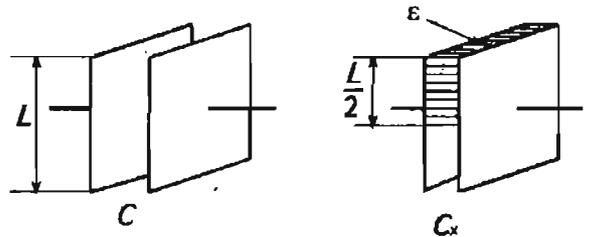


Рис. 59

23. Рассчитайте емкость конденсатора  $C_x$  с диэлектрической пластиной  $\epsilon$ , если без нее емкость конденсатора была  $C$  (рис. 60).

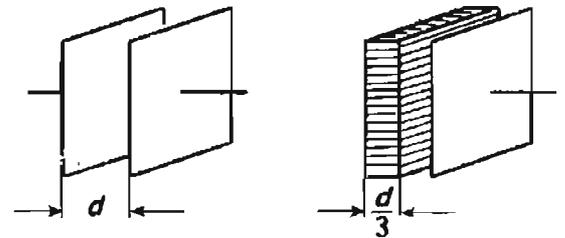


Рис. 60

24. Рассчитайте емкость конденсатора  $C_x$  с диэлектрической пластиной  $\epsilon$ , если без нее емкость конденсатора была  $C$  (рис. 61).

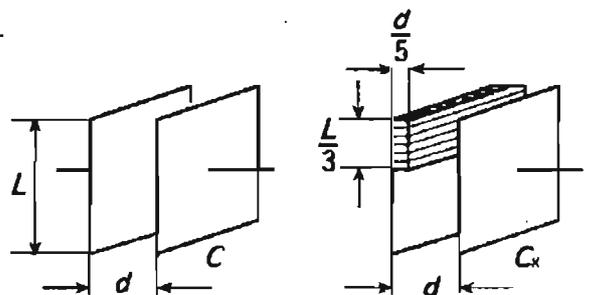


Рис. 61

*Контрольная  
работа*

**Уровень А** (рассчитана на 45 мин)

1. На две параллельные изолированные металлические пластины (рис. 62) поместили одинаковые по модулю, но разные по знаку заряды.

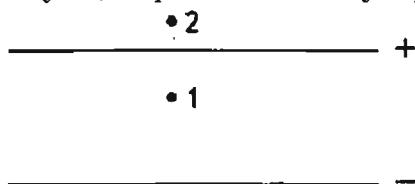


Рис. 62

Сравните напряженности электрического поля в точках 1 и 2.

- А.  $E_1 = E_2 = 0$ ;     Б.  $E_1 > E_2$ ;  
 В.  $E_1 < E_2$ ;         Г.  $E_1 = E_2 \neq 0$

2. При зарядке электрической емкости от источника тока с ЭДС равной 4 В на пластинах скопились заряды по  $2,5 \cdot 10^{-4}$  Кл. Какова емкость конденсатора?

3. Воздушный конденсатор имеет зазор между пластинами 1 мм. Какова будет напряженность поля в этом зазоре, если конденсатор зарядить так, что разность потенциалов между пластинами будет равна 24 В?

4. Конденсатор емкостью 10 мкФ заряжают от источника с ЭДС 200 В. Сколько энергии выделится на спирали лампы, если ее подключить к заряженному конденсатору?

**Уровень Б** (рассчитана на 45 мин)

1. Заряженная частица с зарядом  $-q$  и кинетической энергией  $K$  влетела в конденсатор вблизи отрицательно заряженной пластины. Пролетев некоторое расстояние, она упала на противоположную пластину. Какова была кинетическая энергия частицы перед ударом, если конденсатор был заряжен от источника тока с ЭДС равной  $U$ ?

2. Какой площади должны быть обкладки конденсатора, если они отделены друг от друга промасленной бумагой толщиной 0,01 мм с диэлектрической постоянной  $\epsilon = 4$ , чтобы его емкость составила 1 мкФ. До какого напряжения можно

будет заряжать этот конденсатор, если известно, что в бумаге наступает пробой при напряженности поля  $10\,000 \frac{\text{В}}{\text{см}}$ ?

3. Конденсатор емкостью 2 мкФ заряжается до 10 кВ, а затем его энергия используется для генерирования вспышки лазера длительностью 1 мкс. Какова мощность, выделяемая лазером в виде световой энергии, если в излучение лазера преобразуется 0,5% энергии конденсатора?

**Уровень В** (рассчитана на 45 мин)

1. Протон влетает со скоростью  $v$  параллельно горизонтально расположенным пластинам конденсатора длины  $L$  и покидает конденсатор, сместившись по вертикали на расстояние  $l$ . Каково расстояние  $d$  между пластинами конденсатора, если напряжение на конденсаторе  $U$ ? Заряд и масса протона известны.

2. Диэлектрическая пластина ( $\epsilon = 5$ ) закрывает обкладки конденсатора наполовину, плотно прилегая к ним, как показано на рис. 63. Какую работу совершили для того, чтобы поместить ее между обкладками, если источник с ЭДС 10 В не отключался в этом процессе, а емкость конденсатора до вдвигания пластины составляла 2 нФ?

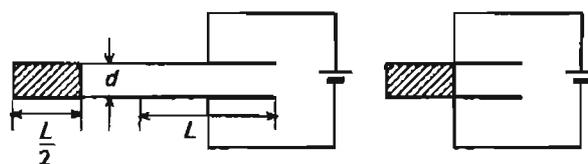


Рис. 63

3. Найдите распределение напряжений и зарядов на всех конденсаторах (рис. 64). Какой заряд пройдет через ключ при его замыкании?

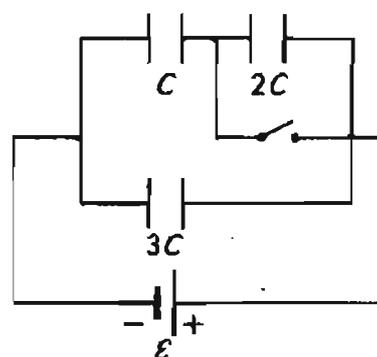


Рис. 64



### Изучив эту тему,

- ♦ вы узнаете, что такое электрический ток в различных средах, какими единицами он измеряется и какое действие производит;
- ♦ научитесь на практике измерять силу тока и демонстрировать его действие на различные тела, приводить примеры токов в различных средах в природе и в технических устройствах;
- ♦ сможете приводить примеры, показывающие, что при объяснении природных явлений используются модели этих явлений

### Основные понятия:

Электрический ток ♦ Сила тока ♦ Носители тока в разных средах ♦ Ионизация ♦ Электролитическая диссоциация ♦ Электроны проводимости ♦ Дырочная проводимость ♦ Действие тока ♦ Амперметр ♦ Электрическая цепь

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

**Электрический ток** — это направленное движение зарядов. В рамках этого определения током можно считать и падающий в воздухе шар, заряженный при электризации трением, и электроны, перемещающиеся в проводнике или вакууме, и положительные (отрицательные) ионы,двигающиеся под действием электрического поля в растворе или воздухе.

### Носители тока в различных средах

В вакууме можно заставить двигаться электроны и ионы атомов. На рис. 65 приведена схема простейшей электронной пушки, аналоги которой используются в современных кинескопах телевизоров и дисплеев.

Электроны вылетают с раскаленной поверхности металла  $K$ , и под действием электрического поля,

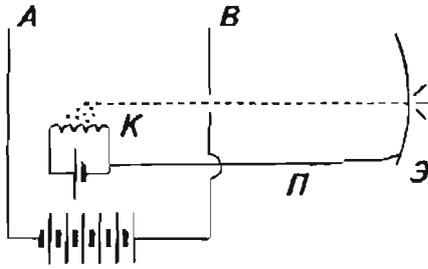


Рис. 65

созданного пластинами *A* и *B*, разгоняются до огромной скорости и через отверстия в пластине *B* попадают на экран *Э*, который начинает светиться в местах удара электронов. Чтобы электроны не скапливались на экране, их возвращают на пластину *K* по проводнику *П*.

В газе, например в воздухе, часто возникает ток в виде электрических разрядов (искры и треск при снятии наэлектризованной одежды, молния между облаками или между землей и облаком). Газоразрядные лампы используются для освещения, разряд электросварки — для плавки металлов.

Природа газового разряда состоит в том, что под действием большой напряженности поля в газе атом «разрывается на части». Электрон отделяется от атома и устремляется в одну сторону, а образовавшийся положительный ион — в другую (рис. 66). Этот процесс называют ионизацией.

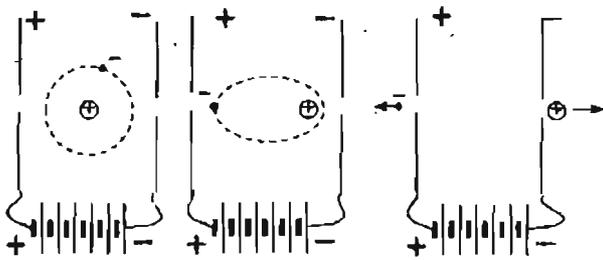


Рис. 66

Разгоняясь в поле, электроны могут при столкновении с другими атомами «разбить» их на части, вызвать ударную ионизацию или соединиться с атомами, образуя отрицательные ионы. Возникает лавина электронов и ионов, которую мы воспринимаем как разряд.

Таким образом, носителями тока в газах служат электроны и ионы.

В растворах и расплавах солей и кислот носителями тока являются ионы  $K^+$  и  $A^-$ ,

которые образуются из молекул  $KA$  (этот процесс называется электролитической диссоциацией). Под действием поля, создаваемого электродами (проводящие стержни или пластины), опущенными в раствор (расплав), ионы двигаются в растворе, создавая ток (рис. 67).

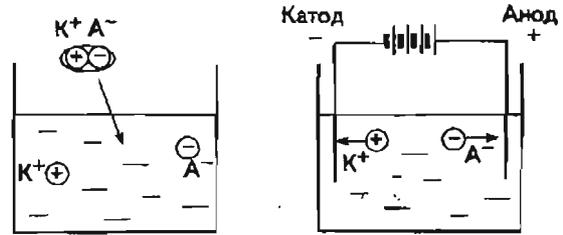


Рис. 67

Электрод, соединенный с «+» источника тока, называют анодом, а соединенный с «-» — катодом. Соответственно, ионы, двигающиеся к аноду, т. е.  $A^-$  называют анионами, а  $K^+$  — катионами.

Использование тока в растворах и расплавах лежит в основе создания и эксплуатации гальванических элементов и аккумуляторов, а также в основе получения веществ и покрытий при пропускании тока через раствор.

В диэлектриках тока не протекают. Однако при пробое диэлектрика в нем возникают процессы, аналогичные возникновению тока в газах.

В металлах протекание тока обеспечивают так называемые свободные электроны или электроны проводимости. В отличие от валентных электронов, локализованных у атома, электроны проводимости (примерно по одному от каждого атома) образуют общее электронное облако. При соединении клемм источника тока с концами металлического проводника, внутри него возникает поле, которое заставляет двигаться свободные электроны в промежутках между узлами кристаллической решетки, образованной ионами металла.

Металлы используются практически во всех технических устройствах, где необходимо обеспечить протекание тока.

В полупроводниках носителями тока являются электроны и так называемые дырки. В отличие от металлов в кристаллах полупроводников (кремний, германий) при нормальных условиях свободных электронов мало. При повышении температуры валентные электроны могут становиться свободными, покидая свои атомы. При этом вблизи

атома образуется вакансия, «дырка», куда может перепрыгнуть электрон с соседнего атома. Такой скачок создаст вакансию на соседнем атоме и т. д. Возникает эффект движения «дырки» в направлении, противоположном дрейфу валентных электронов. Число таких вакансий можно изменить, не только повышая температуру, но и вводя в полупроводник примеси.

Вся современная электронно-вычислительная и телекоммуникационная техника базируется на использовании тока в полупроводниках.

### Действие тока

О том, что по проводнику протекает ток, можно судить по его действию на окружающие тела или среду, через которую он протекает. Выделяют три действия тока: *тепловое*, *химическое*, *магнитное*.

**Тепловое действие тока** используется часто в бытовых электронагревательных приборах и легко может быть продемонстрировано на примере работы утюга, электрочайника или тостера. Связано оно с тем, что носители зарядов в той или иной среде разгоняются под действием электрического поля, приобретают кинетическую энергию, а затем, сталкиваясь с частицами среды, передают ей часть своей энергии. Увеличение средней энергии хаотического движения частиц среды воспринимается нами как разогрев.

Тепловое действие тока проявляется не всегда, а в зависимости от среды, в которой течет ток. Так, если ток представляет собой движение электронов в вакууме или в сверхпроводящих материалах, то теплового действия тока не наблюдается.

**Химическое действие тока** связывают чаще всего с протеканием тока в растворах и расплавах солей, хотя окисление контактов при коротком замыкании тоже может быть примером химического действия тока.

Простейшим примером химического действия могут служить процессы выделения хлора и натрия при пропускании электрического тока через расплав поваренной соли  $\text{NaCl}$  (рис. 68).

Ионы  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ , способные свободно перемещаться в расплаве, при присоединении графитовых электродов, опущенных в расплав, к клеммам источника тока, начинают двигаться в противоположные стороны. Ион  $\text{Na}^+$ , достигая катода, заряженного отрицательно и несущего избыток элект-

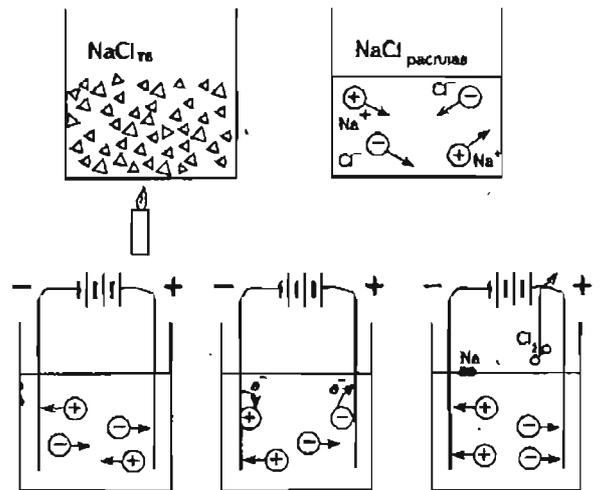


Рис. 68.

ронов, присоединяет электрон и превращается в нейтральный атом  $\text{Na}$ . Соединяясь с другими атомами, он всплывает наверх в виде расплава металлического натрия. Аналогично на аноде ион  $\text{Cl}^-$ , отдавая электроны, превращается в газ хлор, который выделяется из расплава.

Таким образом в промышленности получают некоторые чистые элементы ( $\text{Al}$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{Na}$ ...). В ряде случаев выделяющийся металл оседает на самом материале электрода, что используют для покрытия изделий слоем металла (никелирование, хромирование и т. д.).

**Магнитное действие тока** легко обнаружить по повороту магнитной стрелки компаса вблизи провода, по которому пустили ток. Действие усиливается, если провод скрутить в катушку (рис. 69).

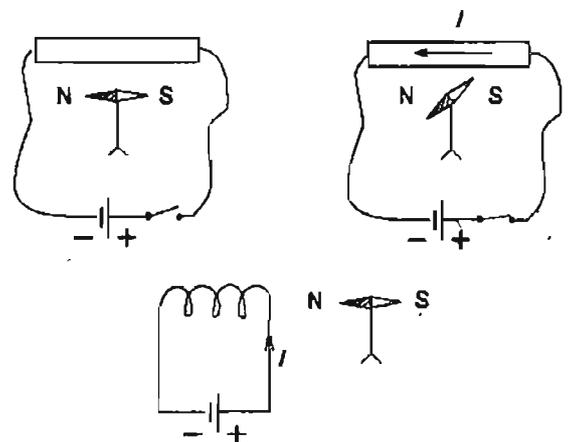


Рис. 69.

Если взять массивный магнит и поднести к нему легкую подвижную катушку, то она начинает дви-

гаться относительно магнита. Если поместить такую катушку между северным и южным полюсами подковообразного магнита, катушка поворачивается на некоторый угол, который определяется длиной и упругостью подводящих проводов (рис. 70).

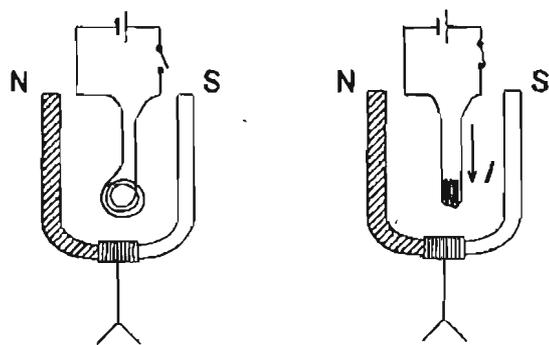


Рис. 70

### Сила тока

Сила тока — физическая величина, показывающая, какой заряд протекает через поперечное сечение проводника за единицу времени.

$$I = \frac{Q}{t}$$

Если за 1 с через поперечное сечение провода или другого проводника (грифель карандаша, раствор соли в стакане и т. д.) протек заряд равный 1 Кл, то сила тока в этом проводнике была равна:

$$\frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ с}} = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{с}} = 1 \text{ А (один ампер)}$$

Единица измерения тока названа в честь французского физика Андре Ампера. Силу тока во встречающихся на практике случаях приходится выражать и в более мелких единицах — миллиампер (мА), микроампер (мкА); и в более крупных единицах — килоампер (кА).

Измерение силы тока можно было бы производить и по тепловому, и по химическому, и по магнитному действию тока. Как показывает опыт, и изменение внутренней энергии, и количество вещества, выделившегося при пропускании тока через раствор (расплав), и скорость поворота магнитной стрелки возрастают с ростом силы тока. Однако наиболее удобным оказалось использование магнитного действия тока. В приборе для измерения силы тока, называемом амперметром, катушка, по

которой пропускается измеряемый ток, поворачивается между полюсами магнита или электромагнита, создаваемого этим же током. В современных полупроводниковых приборах используются уже другие способы измерения силы тока, и результаты выдаются в цифровом виде. Однако чаще всего полупроводниковые приборы требуют для своей работы источник питания.

На схемах амперметр обозначается в виде круга с буквой А посередине (рис. 71).

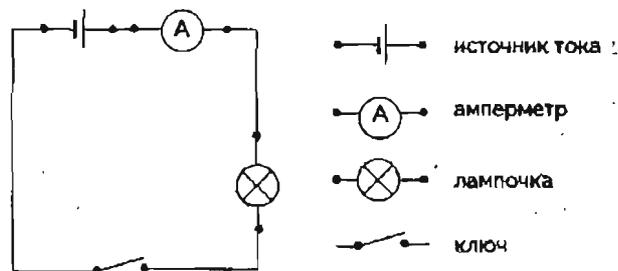


Рис. 71

**Электрические цепи.** Протекание тока в реальных системах происходит через элементы, соединенные различными способами. Способы соединения этих элементов показываются на схемах в виде условных знаков, соединенных в цепи. В зависимости от назначения разные элементы по-разному включаются в электрическую цепь. На рис. 71 изображена цепь, состоящая из знакомых нам элементов: источника тока, амперметра, лампочки накаливания и выключателя (ключа К), замыкающего цепь.

Такой способ соединения элементов называется *последовательным*. В нем весь заряд, протекающий через один элемент цепи протекает и через другой элемент. По этой причине амперметр включается в цепь всегда последовательно. При этом клемма «+» амперметра, должна включаться к той стороне цепи, которая подходит к клемме «+» источника тока.

### Взаимосвязь силы тока с микрохарактеристиками вещества

Сила тока в проводнике тем больше, чем больше концентрация носителей тока в проводнике  $n$ , чем больше скорость их направленного движения  $v_{др}$  (скорость дрейфа), чем больше площадь сечения проводника  $S$  и чем больший заряд  $q$  несет каждый носитель тока.

$$I = qn v_{др} S$$

### Количественные соотношения при протекании тока в различных средах

**Металл.** Если в металлах примерно один электрон каждого атома решетки является свободным, т. е. входит в состав общего электронного облака и обеспечивает протекание тока, то концентрацию  $n$  носителей тока можно рассчитать, зная плотность металла  $\rho$ , его молярную массу  $M$  и число Авагадро:

$$n = n_{\text{ат}} = \frac{N_a \rho}{M}$$

**Раствор.** Если концентрация соли в растворе равна  $C \frac{\text{моль}}{\text{л}}$  и соль образует однозарядные ионы, то концентрацию положительно заряженных носителей тока при протекании тока через раствор легко выразить через молярную концентрацию:

$$n = 10^3 C N_a \left( \frac{1}{M^3} \right)$$

Увеличение заряда иона (в ряду  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ) приводит к пропорциональному увеличению силы тока при равных молярных концентрациях солей.

Ток через раствор невозможен, если на электродах не протекает какая-либо электрохимическая реакция с выделением твердых, жидких или газообразных веществ (**электролиз**). *Масса вещества, выделившегося на электроде, пропорциональна прошедшему через раствор заряду  $u$ , следовательно, силе тока:*

$$m = k I t. \quad (\text{закон Фарадея}).$$

**Электрохимический эквивалент  $k$**  для каждого типа ионов можно найти в справочнике. Фарадей показал, что для выделения на электроде 1 моля одновалентных ионов необходимо пропустить через раствор один и тот же заряд:

$$F = 96\,500 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$$

Это дает возможность выразить электрохимический эквивалент вещества, исходя из механизма

электролиза:  $k = \frac{M}{Fz} = \frac{M}{N_a e z}$ , где  $z$  — заряд реагирующего на электроде иона;  $e$  — заряд электрона,  $N_a$  — число Авагадро.

Электрохимические эквиваленты некоторых веществ представлены в таблице.

Электрохимические эквиваленты веществ	
Вещество	$k, 10^{-4} \text{ кг/Кл}$
Алюминий ( $\text{Al}^{3+}$ )	0,093
Водород ( $\text{H}^+$ )	0,0104
Кислород ( $\text{O}^{2-}$ )	0,083
Медь ( $\text{Cu}^{2+}$ )	0,33
Никель ( $\text{Ni}^{2+}$ )	0,30
Серебро ( $\text{Ag}^+$ )	1,12
Хром ( $\text{Cr}^{3+}$ )	0,18
Цинк ( $\text{Zn}^{2+}$ )	0,34

**Полупроводник.** Собственная проводимость чистых полупроводников низка. При добавлении примесей считается, что каждый атом примеси привносит в полупроводник один электрон проводимости или одну вакансию (дырку, обеспечивающую дырочную проводимость). Концентрация примесей в полупроводниках принято выражать в атомных процентах  $\alpha\%$ . При этом концентрация носителей тока будет равна:

$$n = 0,01 \alpha \frac{N_a \rho}{M},$$

где  $\rho$  и  $M$  плотность и молярная масса основного материала полупроводника (Si, Ge и т. п.).

Закон в виде формул	Обозначения величин, единицы измерения в СИ, справочные значения констант
<p><b>Сила тока</b></p> $I = \frac{Q}{t}$	<p><math>I</math> — сила тока, измеряется в амперах (А)</p> $1 \text{ А} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ с}}$ <p><math>Q</math> — заряд, протекший через поперечное сечение проводника</p> <p><math>t</math> — время, в течение которого протекал заряд</p>
<p><b>Сила тока (взаимосвязь с характеристиками носителей тока)</b></p> $I = qn v_{\text{др}} S$	<p><math>q</math> — заряд одного носителя (если носитель — электрон, то <math>q = 1,6 \cdot 10^{-19}</math> Кл, если носитель <math>\text{Cu}^{2+}</math>, то <math>q = 3,2 \cdot 10^{-19}</math> Кл)</p> <p><math>n</math> — концентрация носителей тока, <math>1/\text{м}^3</math></p> <p><math>v_{\text{др}}</math> — скорость «дрейфа» — направленного движения носителей, м/с</p> <p><math>S</math> — площадь поперечного сечения проводника, <math>\text{м}^2</math></p>
<p><b>КОНЦЕНТРАЦИЯ НОСИТЕЛЕЙ</b></p> <p><b>Металл</b></p> $n \approx n_{\text{ат}} \approx \frac{N_a \rho}{M}$ <p><b>Раствор (для солей типа NaCl)</b></p> $n = 10^3 C N_a \left( \frac{1}{\text{м}^3} \right)$ <p><b>Полупроводник (примесный)</b></p> $n = n_{\text{примеси}} = 0,01 \alpha n_{\text{ат}} \approx 0,01 \frac{\alpha N_a \rho}{M}$	<p><math>n_{\text{ат}}</math> — концентрация атомов, <math>1/\text{м}^3</math></p> <p><math>N_a = 6,02 \cdot 10^{23}</math> — число Авогадро, моль<math>^{-1}</math></p> <p><math>\rho</math> — плотность металла, <math>\text{кг}/\text{м}^3</math></p> <p><math>M</math> — молярная масса металла, <math>\text{кг}/\text{моль}</math></p> <p><math>C</math> — молярная концентрация, моль/л</p> <p><math>n_{\text{примеси}}</math> — концентрация примеси, <math>1/\text{м}^3</math></p> <p><math>n_a</math> — концентрация атомов чистого полупроводника, <math>1/\text{м}^3</math></p> <p><math>\alpha</math> — атомный процент примеси в полупроводнике, %</p> <p><math>\rho</math> — плотность чистого полупроводника, <math>\text{кг}/\text{м}^3</math></p> <p><math>M</math> — молярная масса чистого полупроводника, <math>\text{кг}/\text{моль}</math></p>
<p><b>Закон Фарадея для электролиза расплавов и растворов</b></p> $m = kIt$ $k = \frac{M}{Fz}$	<p><math>m</math> — масса выделившегося на электроде вещества</p> <p><math>k</math> — электрохимический эквивалент, справочная величина для каждого иона, <math>\text{кг}/\text{Кл}</math></p> <p><math>I</math> — сила тока через раствор (расплав)</p> <p><math>t</math> — время пропускания тока при электролизе</p> <p><math>F = 96500</math> Кл/моль, мировая константа, постоянная Фарадея</p> <p><math>z</math> — заряд реагирующего на электроде иона</p>

НОСИТЕЛИ ТОКА В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ		
Среда	Носитель	Пример использования
Вакуум	любая заряженная частица	Кинескоп в телевизоре и мониторе компьютера Масс-спектрометр (прибор для измерения масс молекул и атомов в научных лабораториях) Ускоритель элементарных частиц и ионов
Расплав (раствор)	ион	Электрохимическое производство химических соединений (щелочи, алюминий, натрий, хлор) Электрохимическая очистка промышленных сточных вод (выделение металлов) Ток внутри химических источников тока Покрывание изделий слоем металла
Металл	электрон	Линии электропередач Электронагревательные приборы Радиотехника
Полупроводник	электрон, дырка	Бытовая электроника Компьютерная техника Солнечные батареи

### Лабораторная работа

#### 1. Ознакомление с магнитным и тепловым действием тока

**Цель:** показать, что при протекании тока по проводнику происходит его нагревание и взаимодействие с постоянными магнитами.

**Оборудование:** тонкий медный провод в лаковой или другой изоляции, рифленая пластиковая бутылка, гвоздь, компас, подковообразный магнит, штатив, лампочка для карманного фонарика в держателе (или спираль из нихрома), источник тока ( $\approx 4$  В), амперметр, ключ, соединительные провода, хлопчатобумажная нить.

#### Ход работы

1. Соберите электрическую цепь, состоящую из источника тока, лампочки, ключа, амперметра, как показано на рис. 72.
2. Замкните ключ и убедитесь, что при этом появляется ток в цепи (запишите показания амперметра) и накаляется нить лампы накаливания (она при этом светится).
3. Самостоятельно изготовьте легкую проволочную катушку (если таковой не имеется в кабинете физики). Для этого вырежьте из рифленой части пластиковой бутылки основу для катуш-

ки, возьмите моток тонкого медного провода в изоляции, отступите 40 см от края и намотайте на катушку примерно 20 витков.

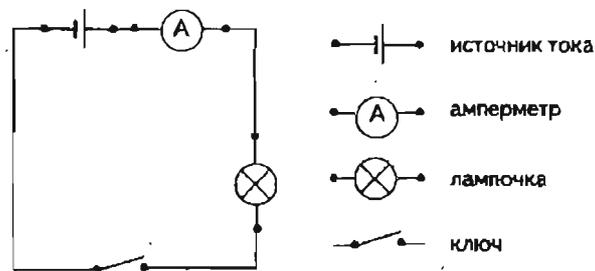


Рис. 72

Затем стяните витки в нескольких местах нитью, чтобы они не соскакивали в ходе опытов с основы. Отмотайте от мотка еще 40 см провода и перережьте его. Скрутите начало и конец провода так, чтобы получилась катушка на гибком подвесе.

4. Укрепите катушку в держателе, отогните в разные стороны концы проводов, идущих от катушки, зачистите их аккуратно ножом от изоляции и последовательно подсоедините катушку и лампочку в собранную вами цепь (рис. 73).
5. Замкните ключ и убедитесь по показаниям амперметра и загоранию лампочки, что по цепи идет ток.

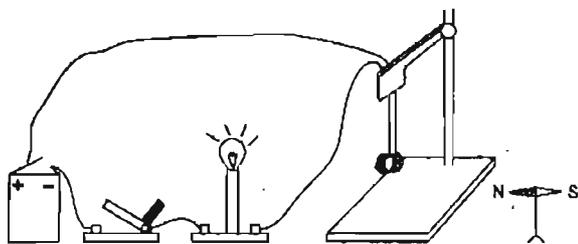


Рис. 73

6. Подведите компас поближе к катушке и наблюдайте, что происходит с его стрелками при замыкании и размыкании ключа.
7. Закрепите большой подковообразный постоянный магнит так, чтобы катушка была надета на один из полюсов, но не касалась его. Если нет подковообразного магнита, используйте два полосовых, подведя противоположными полюсами один внутрь катушки, другой — снаружи (рис. 74).

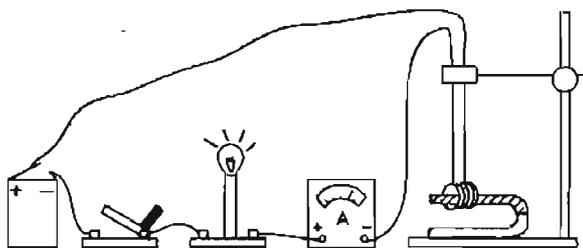


Рис. 74

Когда катушка будет в полном покое, замкните ключ. Если движение катушки очень слабо, придется или увеличить число ее витков, или найти более «сильный» магнит, или убрать из цепи амперметр и лампочку.

**ВНИМАНИЕ!** В последнем случае ток по катушке и по источнику может быть большим, что приведет к перегоранию проводов в источнике тока или в катушке. Поэтому замыкать ключ в этом случае надо на очень короткое время!

8. Получив заметное движение катушки относительно магнита, исследуйте, чем отличается поведение катушки в этом случае и в случае, когда катушка располагается в пространстве между полюсами подковообразного магнита. Что изменится в движении катушки, если поменять полюса магнитов местами? А если поменять мес-

тами провода, подходящие к клеммам «+» и «-» источника тока?

9. (Дополнительно). Придумайте и проверьте экспериментально, как можно продемонстрировать магнитное действие тока с помощью двух железных гвоздей, провода и источника тока.

10. Оформите наблюдения в виде выводов:

- тепловое действие тока доказывает опыт (описание, картинка, схемы) \_\_\_\_\_;
- магнитное действие тока доказывает опыт (описание, картинка, схемы) \_\_\_\_\_;
- в опытах по наблюдению магнитного действия тока отмечены следующие закономерности: \_\_\_\_\_.

## 2. Получение медного покрытия на изделии из диэлектрика

**Цель:** использовать химическое действие тока для покрытия изделия из полимера слоем металла.

**Оборудование:** насыщенный раствор медного купороса (сульфат меди), медная фольга (медная пластина, угольный или графитовый стержень), вода, стакан из диэлектрического материала, лист картона, белая пластмассовая пуговица, графитовый грифель мягкого карандаша, медный провод ( $\approx 0,5$  мм в диаметре), перочинный нож, реостат.

**Ход работы**

1. Налейте раствор медного купороса в стеклянный (пластиковый) стакан, заполнив его примерно наполовину. Из листа картона изготовьте крышку для стакана и с помощью провода с зачищенными от изоляции концами укрепите в ней медную пластину и кусочек графеля так, чтобы они погрузились в раствор, но не касались друг друга (рис. 75).
2. Подсоедините проводами вашу электрохимическую ячейку к источнику тока, включив в цепь последовательно с ячейкой и реостат. Подумайте, к какому полюсу источника нужно присоединить графитовый электрод, чтобы ионы  $\text{Cu}^{2+}$  получали от него электроны, превращались в атомы меди и оседали на графите в виде пленки. Убедитесь в результате этого эксперимента, что грифель покрывается слоем меди.

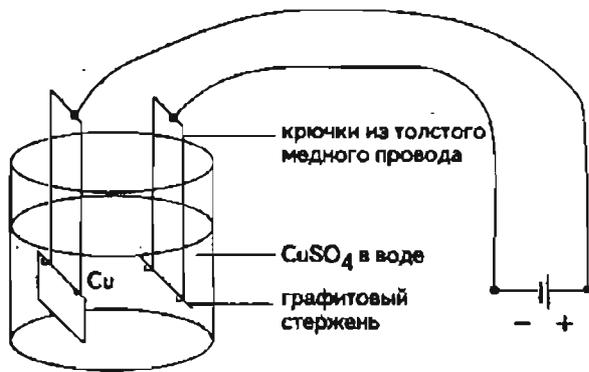


Рис. 75

**ВНИМАНИЕ!** При большом напряжении на электрохимической ячейке возможно протекание на электродах побочных процессов. Регулируя ток в цепи движком реостата, добейтесь, чтобы на электроде, где выделяется медь, не появлялся газ (водород) и не происходило выпадение черного осадка (окислы меди).

3. Как известно, пластмассы являются диэлектриками, поэтому через пластиковую пуговицу ток течь не будет. Для того чтобы обеспечить возможность ионам из раствора взаимодействовать с электронами на поверхности пуговицы, растолките сухой графитовый грифель мягкого простого карандаша и обмажьте этим порошком пуговицу. Можно тщательно покрыть пуговицу сплошным черным слоем, не вынимая грифеля из карандаша, но на это уйдет больше времени. На забудьте покрыть проводящим слоем отверстия пуговицы, за которые вы прикрепите ее к подводящему ток проводу.
4. Прицепите пуговицу к проволочному подвесу и опустите ее на место грифеля в стакан. Подключите провода к источнику тока и наблюдайте за процессом покрытия. Помешивайте раствор и поворачивайте пуговицу для обеспечения ее равномерного покрытия. Обмойте пуговицу водой, проверьте прочность покрытия и покажите пуговицу преподавателю.
5. Запишите химическую реакцию, протекавшую на электроде, а также возможные области применения процесса на практике.

*Самостоятельная работа*

### Обучающий тест

#### Уровень А

1. Ток в вакууме может быть обусловлен движением...
  - А. только электронов.
  - Б. только протонов.
  - В. только ионов.
  - Г. любых заряженных частиц.
2. Примером тока в вакууме можно считать...
  - А. искру при коротком замыкании.
  - Б. электронный пучок в кинескопе телевизора.
  - В. движение электронов в лампе накаливания.
  - Г. разряд молнии в атмосфере.
3. Носителями тока в растворах и расплавах солей являются...
  - А. ионы.
  - Б. электроны.
  - В. «дырки».
  - Г. молекулы.
4. Какое из утверждений верно? В переносе заряда при протекании тока в металлах могут участвовать...
  - 1) валентные электроны.
  - 2) свободные электроны.
  - А. Только 1.
  - Б. Только 2.
  - В. И 1, и 2.
  - Г. Ни 1, ни 2.
5. Магнитное действие тока наблюдается при протекании тока...
  - А. только в вакууме.
  - Б. только в растворах.
  - В. только в металлах.
  - Г. в любой среде.

6. Тепловое действие тока НЕ проявляется при протекании тока...

- А. в расплавах.  
 Б. газах.  
 В. металлах.  
 Г. вакууме.

7. Собрали электрическую цепь, в которой последовательно соединили гальванический элемент, лампочку от карманного фонарика, амперметр, ключ и два электрода, опущенных в раствор поваренной соли. При замыкании ключа можно будет наблюдать...

- А. тепловое действие тока,  
 Б. химическое действие тока.  
 В. магнитное действие тока.  
 Г. все три действия тока.

### Уровень Б

1. Какая формула соответствует выражению для силы тока в проводнике?

- А.  $ev$ .  
 Б.  $ne$ .  
 В.  $nev$ .  
 Г.  $nevS$ .

2. Какими носителями электрического заряда создается ток в полупроводниках?

- А. Только электронами.  
 Б. Только ионами.  
 В. Электронами и «дырками».  
 Г. Электронами и ионами.

3. Каким типом проводимости обладают полупроводниковые материалы без примесей?

- А. В основном электронной.  
 Б. В основном дырочной.  
 В. В равной степени электронной и дырочной.  
 Г. Ионной

4. Каким типом проводимости обладают полупроводниковые материалы с донорными примесями?

- А. В основном электронной.  
 Б. В основном дырочной.  
 В. В равной степени электронной и дырочной.  
 Г. Ионной.

5. В четырехвалентный кремний добавили первый раз трехвалентный индий, а во второй раз пятивалентный фосфор. Каким типом проводимости в основном будет обладать полупроводник в каждом случае?

- А. В I — дырочной, во II — электронной.  
 Б. В I — электронной, во II — дырочной.  
 В. В обоих случаях электронной.  
 Г. В обоих случаях дырочной.

6. Как изменится масса вещества, выделившегося на катоде за 1 мин, при увеличении силы тока, протекающего через раствор соли, в 2 раза?

- А. Не изменится.  
 Б. Увеличится в 2 раза.  
 В. Увеличится в 4 раза.  
 Г. Уменьшится в 2 раза.

7. В процессе электролиза положительные ионы перенесли на катод за 5 секунд положительный заряд 5 Кл, отрицательные ионы перенесли на анод такой же по модулю отрицательный заряд. Чему равна сила тока в цепи?

- А. 0,5 А.  
 Б. 1 А.  
 В. 2 А.  
 Г. Среди ответов А–В нет правильного.

8. Через растворы  $\text{CuSO}_4$  и  $\text{CuCl}_2$  пропустили одинаковый заряд. Сравните массы меди, выделившейся на катоде в обоих случаях.

- А.  $m_1 = m_2$ .  
 Б.  $m_1 > m_2$ .  
 В.  $m_1 < m_2$ .  
 Г. Среди ответов А–В нет правильного.

*Тренировки по  
решению задач*

## Определение силы тока

### Уровень А

1. На одном металлическом шаре находится заряд  $10^{-6}$  Кл. При соединении его с другим таким же шаром заряды выравнялись за 0,2 с. Какой заряд протек по проводу, которым соединили шары, и какова была сила тока в проводе?
2. В цепи, состоящей из последовательно соединенных источника тока, амперметра и лампы, амперметр показывает силу тока 0,2 А. Постройте график зависимости заряда, протекшего через лампочку от времени.
3. При разряде молнии в ней течет ток 2000 А, при этом с одного облака на другое перетекает заряд равный 500 Кл. Сколько времени длится разряд молнии?

### Связь силы тока в среде со скоростью и концентрацией носителей

#### Уровень Б

#### Пример решения задачи

Через раствор  $\text{CuCl}_2$  пропускают ток силой 0,1 А. При этом ионы в растворе движутся со скоростью  $10^{-3} \frac{\text{м}}{\text{с}}$  между двумя близко расположенными плоскими квадратными (со стороны 5 см) электродами. Какова концентрация  $\text{CuCl}_2$  в растворе? Выразите ее в молях на литр. Сколько меди выделится на электроде за 10 минут, если сила тока через раствор равна 0,1 А; на каком из электродов?

Дано: раствор  $\text{CuCl}_2$ ;  
 $I = 0,1 \text{ А}$ ;  
 $v = 10^{-3} \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;  
 $a = 5 \text{ см} = 0,05 \text{ м}$ ;  
 $t = 10 \text{ мин} = 600 \text{ с}$   
 $n = ?$   $m = ?$

Решение. Вследствие электролитической диссоциации молекулы  $\text{CuCl}_2$  при растворении в воде распадаются на ионы  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Cl}^-$ . Если концентрация ионов меди в растворе  $n$ , то ионов хлора  $2n$ .

Сила тока, проходящего через раствор между электродами, так же как сила тока внешней цепи равна:

$$I = q_{\text{Cu}^{2+}} \cdot n \cdot S \cdot v.$$

Заряд иона меди  $q_{\text{Cu}^{2+}} = 2e$ , площадь поперечного сечения проводника можно считать равной площади пластины — электрода  $S = a^2$ , тогда:

$$I = v \cdot 2e \cdot n \cdot a^2, \text{ откуда:}$$

$$n = \frac{I}{2ea^2v} = \frac{0,1}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (0,05)^2 \cdot 10^{-3}} = 1,25 \cdot 10^{23} (\text{м}^{-3}).$$

Для перевода концентрации, выраженной в частицах на  $\text{м}^3$ , в  $\frac{\text{моль}}{\text{м}^3}$  достаточно эту цифру поделить на число Авагадро, а для получения молярной концентрации  $C$  в  $\frac{\text{моль}}{\text{л}}$  еще разделить на 1000:

$$C = \frac{1,25 \cdot 10^{23}}{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 10^3} \approx 0,0002 \left( \frac{\text{моль}}{\text{л}} \right).$$

Для ответа на второй вопрос задачи воспользуемся законом Фарадея для электролиза:

$$m = \chi It.$$

Электрохимический эквивалент  $\chi$  для иона  $\text{Cu}^{2+}$  найдем в таблице:  $\chi = 0,33 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$ , тогда:

$$m = 0,33 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1 \cdot 600 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ кг} = 20 \text{ мг}.$$

Ионы  $\text{Cu}^{2+}$  подходят к катоду, получают каждый по 2 электрона, превращаются в атом  $\text{Cu}^0$  и осаждаются на электроде.

Ответ. Концентрация соли в растворе  $2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{моль}}{\text{л}}$ ; 20 мг меди высадилось на катоде.

4. Сколько электронов проходит через поперечное сечение проводника за 2 нс при силе тока 64 мкА?
5. Найти силу тока в медном проводе сечением  $25 \text{ мм}^2$ , если под действием электрического поля электроны движутся со средней скоростью направленного движения  $0,03 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$ . Считать, что на каждый атом меди приходится один электрон проводимости. Плотность  $\text{Cu}$  равна  $8900 \text{ кг/м}^3$ .
6. Оцените скорость направленного движения ионов меди при протекании тока через раствор  $\text{CuCl}_2$  при силе тока 0,1 А и концентрации соли  $0,01 \frac{\text{моль}}{\text{л}}$ . Ионы в растворе движутся между двумя близко расположенными плоскими квадратными (со стороны 5 см) электродами.

Сколько меди выделится на электроде за 10 минут? На каком из электродов?

### Уровень В

7. Деталь из меди покрывают слоем никеля, пропуская ток в 0,5 А через раствор соли  $\text{NiCl}_2$  в течение 0,5 часа. Какой толщины слой никеля образовался, если деталь покрылась равномерно, а ее площадь поверхности составляет  $50 \text{ см}^2$ ? Плотность Ni равна  $8900 \text{ кг/м}^3$ .
8. В электронно-лучевой трубке кинескопа телевизора пучок электронов движется от катода к экрану в вакууме со скоростью  $10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  и, попадая на экран кинескопа, дает пятно площадью  $0,1 \text{ мм}^2$ . Сила тока равна 32 мА. Какова средняя концентрация электронов в пучке?
9. Полупроводниковое покрытие детали из диэлектрика шириной 1 см и длиной 5 см было получено напылением соединений четырехвалентного кремния и трехвалентного индия с соотношением  $\text{In} : \text{Si} = 1 : 10\,000$  (0,01 атомный %). В условиях напыления, соединения элементов разлагались и дали слой примесного (Si-In) полупроводника с дырочным типом проводимости. Толщина слоя 10 мкм. Оцените скорость движения дырок в полупроводнике при пропускании тока в 1 мА вдоль стороны 5 см покрытия. Плотность кремния  $2330 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ . Молярная масса  $0,028 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ .

*Контрольная  
работа*

### Уровень А (рассчитана на 45 мин)

1. Выберите из предложенного ряда среды, в которых носителями тока могут быть только ионы: металл, газ, вакуум, водные растворы солей, расплав, полупроводник.
2. Какие действия сопровождают прохождение тока через любые среды при комнатной температуре?
  - А. Только тепловые.
  - Б. Только магнитные.
  - В. Только химические.
  - Г. Тепловые и магнитные.
3. Расплавится ли нить предохранителя, рассчитанная на ток в 5 А, если по ней за 1 мин. протечет заряд в 30 Кл? Ответ обоснуйте расчетом.

4. Приведите примеры устройств, в которых можно наблюдать ток в полупроводнике, газе и вакууме.

### Уровень Б (рассчитана на 45 мин)

1. Дайте определение понятий и явлений: электроны проводимости, катион, ионизация, дырочная проводимость. К протеканию тока в какой среде имеет отношение каждый из этих терминов?
2. Как можно было бы использовать тепловое и химическое действие тока для измерения силы тока в проводниках? Как на практике производится измерение силы тока?
3. Оцените скорость направленного движения носителя тока в алюминиевом проводе сечением  $0,5 \text{ мм}^2$  при силе тока 2 А.

### Уровень В

1. Оцените скорость направленного движения носителя тока в вакуумированной электронно-лучевой трубке с разностью потенциалов между катодом и ускоряющим анодом 20 кВ.
2. При пропускании электрического тока 0,5 А через раствор серной кислоты в воде выделился водород, который при нормальных условиях занял объем 2,24 л. Сколько времени пропускали ток через раствор? Недостающие данные возьмите в справочных таблицах.
3. В полупроводнике на основе кремния с электронной примесной проводимостью при площади поперечного сечения  $1 \text{ мм}^2$  ток 1,6 А обеспечивают носители, двигающиеся со скоростью  $0,1 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$ . Какова концентрация этих носителей и какова концентрация примесных атомов в кремнии?

*Творческие  
задания*

### Уровень Б

1. Физик Стоней, который ввел в обиход термин «электрон», пришел к мысли о том, что должна существовать минимальная порция заряда  $e$ , переносимая ионами, размышляя о диссоциации молекул солей на ионы и законах электролиза Фарадея. Придумайте и осуществите эксперимент, позволяющий, изучая законы электролиза, оценить этот минимальный заряд, зная число Авагадро.



# Напряжение, сопротивление. Закон Ома для участка цепи

## Изучив эту тему,

- ♦ вы узнаете, какова связь между напряжением на концах проводника, его сопротивлением и силой тока в нем;
- ♦ поймете как анализируют графики зависимости силы тока на участке цепи от напряжения на его концах и рассчитывают по ним сопротивление участка цепи;
- ♦ сможете на практике выбрать проводник с нужным сопротивлением

## Основные понятия:

Электрическое напряжение • Участок электрической цепи • Электрическое сопротивление участка цепи • Вольтметр • Удельное сопротивление • Материал проводника

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

**Электрическое напряжение ( $U$ )** — физическая величина, равная отношению работы  $A$  электрического поля по перемещению заряда между концами участка цепи к переносимому через данный участок цепи заряду  $q$ .

$$U = \frac{A}{q}$$

Работа, произведенная при этом, проявляется в том или ином действии тока (нагревание, образование

химических связей и т. д.), и часто называется **работой тока**. Ясно, что в конечном итоге эту работу производит источник тока.

Для участка цепи, по которому течет ток и который не содержит источника тока (рис. 76), термин **напряжение** эквивалентен термину **разности потенциалов**  $\varphi_1 - \varphi_2$ , и тогда можно говорить о работе электрического поля, существующего на этом участке цепи и совершающем работу по перемещению заряда  $q$ . При этом, конечно, не следует забывать, что поле это создано источником тока.

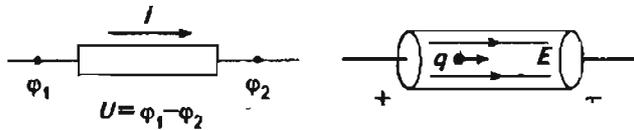


Рис. 76

Единица измерения напряжения совпадает с единицей, введенной для разности потенциалов электрического поля:  $1\text{В (вольт)} = \frac{1\text{Дж}}{1\text{Кл}}$ .

Необходимость введения понятия «напряжения» помимо понятия «сила тока» объясняется тем, что сила тока не всегда характеризует в полной мере действие этого тока. На рис. 77 изображены две лампочки с разными нитями накала, и хотя амперметры показывают одинаковую силу тока, вторая лампа «горит ярче», т. е. испускает в пространство больше энергии.

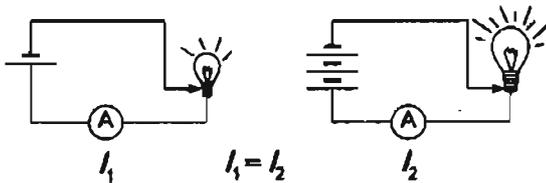


Рис. 77

Смысл напряжения понятен из механической аналогии электрической цепи. Работа, которую совершит двигающаяся по желобу вода, зависит не только от количества воды, стекающей с конца желоба (сила тока), но и от «напора» воды, скорости, которую она приобрела в результате перепада уровней в начале и конце желоба, хотя скорость воды тоже зависит от этого перепада. Эту зависимость для электрических цепей впервые исследовал Георг Ом:

$$I \sim U \text{ или } I \sim (\phi_1 - \phi_2).$$

Разное напряжение Ом создавал различными источниками тока, силу тока измерял по магнитному действию тока.

**Вольтметр** — прибор для измерения напряжения на участке цепи. Подключается параллельно к концам того участка цепи, на котором хотят измерить напряжение (рис. 78).

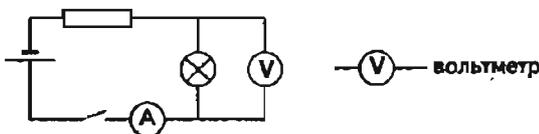


Рис. 78.

### Закон Ома для участка цепи

Сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению на концах участка.

$$I = \sigma \cdot U$$

Опыт показывает, что коэффициент пропорциональности  $\sigma$  не зависит от величин  $I$  и  $U$ , то есть отношение  $\frac{I}{U}$  зависит только от характеристик участка цепи. Коэффициент  $\sigma$  показывает, насколько хорошо при данном напряжении участок цепи пропускает заряды, проводит ток, поэтому называется **проводимостью**. Величина обратная  $\sigma$ :

$$R = \frac{1}{\sigma}$$

показывает, насколько хорошо участок сопротивляется прохождению тока, поэтому называется **электрическим сопротивлением**.

Закон Ома чаще всего записывается в виде

$$I = \frac{U}{R}$$

Сила тока  $I$  прямо пропорциональна напряжению  $U$  и обратно пропорциональна электрическому сопротивлению  $R$  участка цепи.

Единица измерения электрического сопротивления названа в честь Георга Ома. 1 Ом — сопротивление такого проводника, по которому при разности потенциалов на его концах 1В течет ток 1А.

### Сопротивление металлического проводника

Ом также показал, что электрическое сопротивление металлических проводников  $R$  пропорционально их длине  $L$  и обратно пропорционально площади их поперечного сечения  $S$ .

$$R = \frac{\rho_{эл} L}{S}$$

Коэффициент пропорциональности  $\rho_{эл}$  (не следует путать с плотностью  $\rho$  материала проводника!) — **удельное электрическое сопротивление** измеряется в Ом·м, является характеристикой материала проводника. Значения  $\rho_{эл}$  для разных материалов приведены в справочной таблице. Хорошими проводниками считаются серебро ( $\rho_{эл} = 1,6 \cdot 10^{-8}$  Ом·м) и медь ( $\rho_{эл} = 1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м).

Законы в виде формул	Обозначения величин, единицы измерения в СИ, справочные значения констант
<p>Электрическое напряжение</p> $U = \frac{A}{q}$	<p><math>U</math> — электрическое напряжение, 1 Вольт = <math>\frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}</math>  <math>A</math> — работа по перемещению заряда  <math>q</math> — перемещенный заряд</p>
<p>Закон Ома для участка цепи</p> $I = \frac{U}{R}$	<p><math>I</math> — сила тока на участке цепи  <math>U</math> — напряжение на концах участка цепи  <math>R</math> — электрическое сопротивление цепи; <math>1 \text{ Ом} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}}</math></p>
<p>Связь электрического сопротивления с формой и материалом проводника</p> $R = \frac{\rho_{\text{эл}} L}{S}$	<p><math>R</math> — сопротивление проводника  <math>\rho_{\text{эл}}</math> — удельное электрическое сопротивление проводника, Ом · м  <math>L</math> — длина проводника, м  <math>S</math> — площадь поперечного сечения проводника, м<sup>2</sup></p>
<p>Температурная зависимость сопротивления металлических проводников</p> $\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t^\circ)$	<p><math>\rho_t</math> — удельное сопротивление при <math>t^\circ \text{C}</math>  <math>\rho_0</math> — удельное сопротивление при <math>0^\circ \text{C}</math>  <math>\alpha</math> — температурный коэффициент сопротивления  <math>t^\circ</math> — температура</p>

Удельное сопротивление металлов растет с температурой по линейному закону

$$\rho_{t^\circ} = \rho_0 \cdot (1 + \alpha t^\circ)$$

### Сопротивление других материалов

Зависимость сопротивления от длины и площади поперечного сечения, обнаруженная для металлов, выполняется и для других материалов.

Удельное сопротивление материалов позволяет условно их разбить на группы:

- проводники:
  - сплав нихром  $\approx 10^{-6}$  Ом·м;
  - графит  $\approx 10^{-5}$  Ом·м;
  - расплав NaCl при  $850^\circ \text{C} \approx 3 \cdot 10^{-3}$  Ом·м;
  - речная вода  $\approx 10$  Ом·м;
- диэлектрики:
  - мрамор  $\approx 10^5$  Ом·м;
  - дерево  $\approx 10^9$  Ом·м;
  - алмаз  $\approx 10^{10}$  Ом·м;
  - фарфор  $\approx 10^{12}$  Ом·м;
  - полиэтилен  $\approx 10^{15}$  Ом·м.

Удельное сопротивление материалов  $\rho_0$  и температурный коэффициент удельного сопротивления  $\alpha$

Вещество	$\rho_0, 10^{-8}$ Ом·м	$\alpha, \text{K}^{-1}$
Алюминий	2,7	0,0042
Вольфрам	5,4	0,0048
Медь	1,6	0,0043
Свинец	21	0,0037
Серебро	1,5	0,004
Никелин	42	0,001
Нихром	105	0,001
Сталь	12	0,006
Константан	50	-0,00005

Материалы с промежуточным значением удельного электрического сопротивления относили к полупроводникам. По современной классификации к полупроводникам относят материалы, у которых сопротивление убывает с ростом температуры (в отличие от проводников, для которых наблюдается рост сопротивления с ростом температуры).

*Лабораторные работы*

**1. Изучение Закона Ома**

**Цель:** приобретение навыков работы с амперметром и вольтметром, исследование взаимосвязи между напряжением на концах участка цепи и током, протекающим через этот участок.

**Оборудование:** амперметр, вольтметр, нихромовый провод с сопротивлением ~1 Ом, реостат на 6 Ом, источник тока, ключ, соединительные провода.

**Примечание.** При отсутствии провода и реостата можно обойтись тремя стандартными спиралями-резисторами или даже кусками спирали от перегоревшего утюга или другого нагревательного прибора.

**Ход работы**

1. Ознакомьтесь с устройством реостата (рис. 79)



Рис. 79

2. Соберите цепь, содержащую последовательно соединенные источник тока, ключ, реостат и амперметр, как показано на рис. 80.

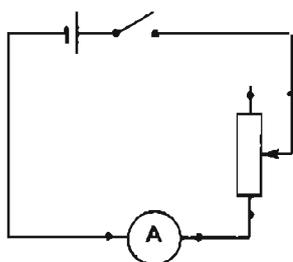


Рис. 80

Двигая ручку реостата и следя за показаниями амперметра, убедитесь, что реостат позволяет регулировать силу тока в цепи.

**ВНИМАНИЕ!** Не пропускайте по цепи ток больше 2 А (это предел школьного амперметра). Вы можете не только испортить приборы, но и обжечься, так как при такой силе тока спираль реостата разогревается.

Реостат имеет спираль, намотанную на керамический корпус. Его конструкция позволяет пропускать ток по всей спирали (АС) или ее части (АВ).

3. Включите в цепь дополнительно провод из нихрома с большим сопротивлением (прямой или свернутый в спираль и закрепленный в каркасе), а также подключите к его концам вольтметр, как показано на рис. 81.

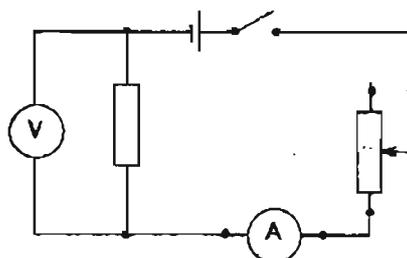


Рис. 81

4. Меняя положение рычажка реостата, добейтесь того, чтобы показания вольтметра соответствовали 1В, и измерьте силу тока, протекающего при этом через спираль-резистор. Данные занесите в таблицу:

U, В	1±0,1				
I, А					

Значения напряжения и силы тока следует записывать с учетом погрешности измерения (она примерно равна цене деления прибора). Подбирая другие значения напряжения на резисторе, заполните таблицу, указывая в ней и соответствующие значения силы тока при данном напряжении.

**Примечание.** Если отсутствует реостат, следует провести не менее трех измерений тока через резистор и напряжения на нем, присоединяя к нему последовательно 1, 2, 3 дополнительных спирали, не меняя при этом положение вольтметра и амперметра в цепи.

5. Постройте график зависимости силы тока от напряжения, указав на нем и погрешности измерения. Проведите прямую, проходящую через начало координат и через все точки (с учетом погрешности измерений). Как можно назвать

такую зависимость в пределах погрешности измерений?

6. Какое значение напряжения соответствует на графике этой зависимости силе тока  $I = 2 \text{ A}$ ? Оцените на основе этих данных сопротивление вашего резистора или проводника.
7. Изменив форму проводника или освободив спираль от кожуха, проведите дополнительные измерения и сделайте вывод, зависит ли сопротивление резистора от формы, которую имеет провод. При этом надо следить, чтобы не было смыкания отдельных витков спирали или отдельных участков провода!
7. Запишите выводы:
  - а) ток через резистор (растет, убывает) с ростом напряжения на его концах \_\_\_\_\_ (каким образом? по какому закону?)
  - б) сопротивление резистора равно \_\_\_\_\_ и (не) зависит от формы размещения провода в пространстве.

## 2. Определение сопротивления металлических проводников правильной формы

Цель: приобретение навыков расчета сопротивления проводника по известным геометрическим параметрам и материалу.

**Оборудование:** стальная линейка или пластина прямоугольной формы, алюминиевая фольга (обертка от шоколада), медный провод круглого сечения, стальной гвоздь, линейка с миллиметровыми делениями или штангенциркуль.

**Ход работы**

1. Измерьте длину  $L$ , ширину  $b$  и толщину  $h$  пластины прямоугольной формы. Представьте себе, что вдоль этой пластины как по участку цепи должен протечь ток. Рассчитайте площадь поперечного сечения  $S = bh$ . Найдите в справочной таблице значение удельного сопротивления стали и рассчитайте сопротивление вашего проводника  $R = \frac{\rho_{ст} L}{S}$ . Результаты занесите в таблицу.
2. Сложите из алюминиевой фольги многослойную полоску шириной  $b$  около 1 см. Проведите необходимые замеры и рассчитайте сопротивление такого проводника. Занесите результаты расчетов в таблицу.  
 Каким будет сопротивление проводника, если тот же лист фольги разрезать на полоски шириной по 1 см и скрепить их концы в одну длинную ленту?
3. Измерьте длину и диаметр медного провода круглого сечения. Рассчитайте площадь поперечного сечения (круг диаметром  $D$  и радиусом

Проводник	Длина, м	Ширина Толщина (прямоугольное сечение) Диаметр (круглое сечение)	Площадь поперечного сечения, м <sup>2</sup>	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Сопротивление, Ом	Сила тока при напряжении на концах $U=1\text{В}$
Стальная пластина						
Алюминиевая фольга						
Медный провод						
Стальной гвоздь						

$r = \frac{D}{2}$ )  $S = \pi r^2$ . Рассчитайте сопротивление проводника.

4. Проведите аналогичные измерения для круглого гвоздя в качестве проводника.
5. Рассчитайте, какой ток проходил бы по каждому из проводников, если бы на их концах было создано напряжение 1В. Заполните по результатам расчетов таблицу. (Пусть большие цифры вас не смущают, у ваших проводников слишком маленькое сопротивление).

**Примечание.** Если у вас нет штангенциркуля, а толщина материала проводника мала, придется сложить его в много слоев или намотать на карандаш виток к витку много раз, тогда погрешность измерения миллиметровой линейкой снизится. Можно также использовать взвешивание проводника и оценку его толщины с использованием плотности вещества.

*Самостоятельная работа*

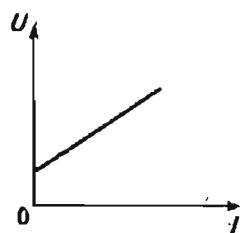
### Обучающий тест

#### Уровень А

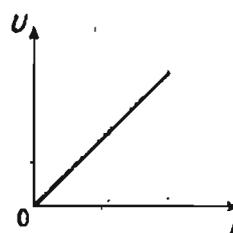
1. Электрическое напряжение на концах участка цепи измеряется в одинаковых единицах с...
  - А. напряженностью электрического поля.
  - Б. ЭДС источника тока.
  - В. работой по перенесению зарядов.
  - Г. напором воды в плотине гидроэлектростанции.
2. При увеличении напряжения на концах участка цепи в 4 раза, сила тока на этом участке цепи...
  - А. не меняется.
  - Б. уменьшается в 4 раза.
  - В. увеличивается в 4 раза.
  - Г. увеличивается в 2 раза.
3. Выберите выражение для расчета сопротивления проводника при известных значениях силы тока  $I$ , протекающего через него, и напряжения  $U$  на его концах.

- А.  $IU$ .
- Б.  $\frac{I}{U}$ .
- В.  $\frac{U}{I}$ .
- Г.  $\frac{IU}{2}$ .

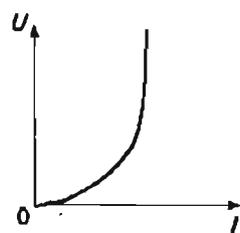
4. При увеличении длины проводника в 3 раза его электрическое сопротивление...
  - А. увеличится в 3 раза.
  - Б. уменьшится в два раза.
  - В. увеличится в 9 раз.
  - Г. не изменится.
5. Имеются два проводника из меди одинаковой длины: один круглого, другой квадратного сечения. Площадь сечения  $S_1 = S_2$ . Сравните их электрические сопротивления.
  - А.  $R_1 = R_2$ .
  - Б.  $R_1 > R_2$ .
  - В.  $R_1 < R_2$ .
  - Г. нельзя сказать определенно.
6. На каком из графиков приведена правильная зависимость напряжения на концах проводника от тока, протекающего через проводник?



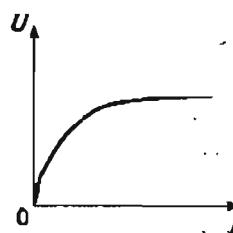
1



2



3



4

- А. 1.
- Б. 2.
- В. 3.
- Г. 4.

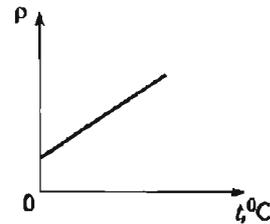
## Уровень Б

1. Электрическое напряжение на проводнике — это по определению...
- А. разность потенциалов между концами проводника.
- Б. работа сил электрического поля по перемещению заряда с одного конца проводника на другой.
- В. отношение работы сил электрического поля по перемещению заряда с одного конца проводника на другой к величине заряда.
- Г. синоним напряженности поля в проводнике.
2. При увеличении напряжения на концах участка цепи в 4 раза электрическое сопротивление этого участка цепи...
- А. возрастает в 4 раза.
- Б. уменьшается в 4 раза.
- В. уменьшается в 2 раза.
- Г. не изменяется.
3. При увеличении напряжения на концах проводника и его сопротивления в 2 раза, сила тока в цепи...
- А. возрастет в 2 раза.
- Б. возрастет в 4 раза.
- В. уменьшится в 4 раза.
- Г. не изменится.
4. При увеличении длины и площади поперечного сечения проводника в 3 раза, его электрическое сопротивление...
- А. не изменится.
- Б. увеличится в 3 раза.
- В. увеличится в 9 раз.
- Г. уменьшится в 9 раз.
5. Имеются два проводника одинаковой длины один круглого, другой квадратного сечения. Площадь сечения  $S_1 = S_2$ . Сравните их электрические сопротивления.
- А.  $R_1 = R_2$ .
- Б.  $R_1 > R_2$ .

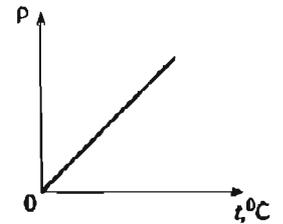
В.  $R_1 < R_2$ .

Г. зависит от материала проводника.

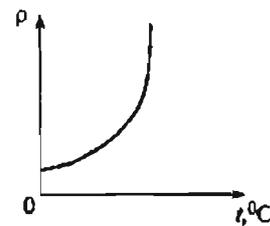
6. На каком из графиков приведена правильная зависимость удельного сопротивления проводника от температуры?



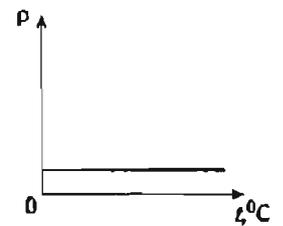
1



2



3



4

А. 1.

Б. 2.

В. 3.

Г. 4.

*Практикум по  
решению задач*

## Закон Ома для участка цепи

## Уровень А

1. Спираль лампы имеет сопротивление 40 Ом. Какова сила тока в лампе при напряжении на клеммах ее держателя равном 100 В?
2. Что покажет вольтметр в цепи, изображенной на рис. 82, если сопротивление резистора 2 Ом, а амперметр показывает силу тока 1,5 А?

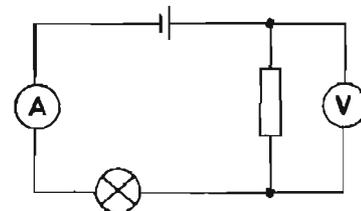


Рис. 82

3. По графику зависимости силы тока от напряжения на участке цепи (рис. 83) определите сопротивление участка цепи, для которого эта зависимость получена.

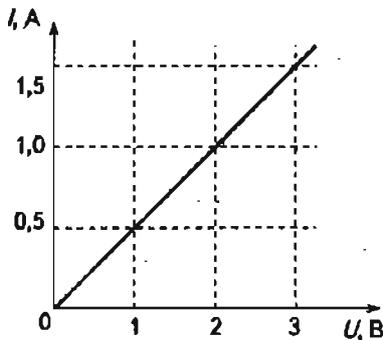


Рис. 83

### Уровень Б

4. Накал лампы, включенной в схему, показанную на рис. 84, регулируется ползунком реостата. Вольтметр при слабом накале показал 0,8 В, при сильном — 1 В. Во сколько раз возросло показание амперметра, если сопротивление спирали лампы считать постоянным? Насколько верно предположение о постоянстве сопротивления спирали лампочки?

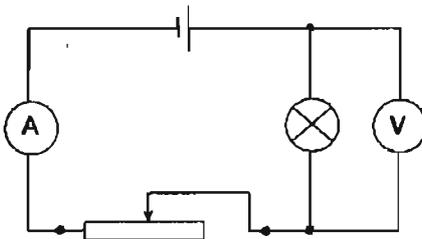


Рис. 84

- При изучении протекания тока через ячейку с раствором соли измеряют силу тока и напряжение между двумя электродами, опущенными в раствор. При напряжении 1 В, сила тока составила 0,2 А, а при напряжении 2 В — 0,45 А. Как изменилось электрическое сопротивление ячейки? Почему это могло произойти?

Постройте график зависимости силы тока от напряжения на резисторе, если при разности потенциалов на его концах равной 2 В сила тока была равна 5 мА.

## Расчет сопротивления проводника по геометрическим параметрам

### Пример решения задачи

Какова длина алюминиевого провода с площадью поперечного сечения  $0,5 \text{ см}^2$ , если его сопротивление составляет 2,8 Ом?

Дано:  $S = 0,5 \text{ см}^2 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ ;  
 $R = 2,8 \text{ Ом}$ ;  
 $\rho_{\text{ал}} = 0,028 \text{ мкОм} \cdot \text{м} = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  
 $L - ?$

Решение:

$$R = \frac{\rho_{\text{ал}} L}{S}, \text{ откуда: } L = \frac{RS}{\rho}$$

$$L = \frac{5 \cdot 10^{-5} \cdot 2,8}{2,8 \cdot 10^{-8}} = 5 \cdot 10^3 \text{ (м)}$$

Ответ: 5 км.

### Уровень А

- Для изготовления спирали лампы накаливания взяли 0,4 м вольфрамовой проволоки с площадью поперечного сечения  $0,002 \text{ мм}^2$ . Каково ее сопротивление, если удельное сопротивление вольфрама равно  $0,055 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ?
- Какова длина медного провода с площадью поперечного сечения  $0,1 \text{ см}^2$ , если его сопротивление составляет 6,4 Ом? Недостающие данные найти в справочных таблицах.
- Сопротивление провода длиной 10 м и площадью поперечного сечения  $0,01 \text{ мм}^2$  составляет 120 Ом. Из какого материала он может быть изготовлен?
- Известно, что сопротивление проволоки из никелина (удельное сопротивление  $0,42 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ) длиной 2 м составляет 0,84 Ом. Какова площадь поперечного сечения этого провода в  $\text{мм}^2$ ?

### Уровень Б

- Каково сопротивление 1 м провода из константана диаметром 0,8 мм?
- Известно, что сопротивление спирали лампочки карманного фонарика составляет 15 Ом. Какой длины вольфрамовый провод взят для ее изготовления, если ее диаметр равен 0,1 мм?

13. При намотке катушки из медного провода ее масса возросла на 1,78 г, а сопротивление оказалось равным 34 Ом. Оцените по этим данным длину и площадь поперечного сечения провода.
14. На сколько процентов возрастает сопротивление проводов из вольфрама и никелина при нагревании на 500 °С, если их температурные коэффициенты удельного сопротивления равны соответственно 0,0048 и 0,0001 °С<sup>-1</sup>?
15. Оцените, во сколько раз отличаются сопротивления оловянного провода квадратного сечения со стороной 1 мм и длиной 10 м при комнатной температуре, фольги той же длины, полученной раскатыванием этого провода до толщины 100 мкм, и жидкого олова, полученного плавлением этого провода и налитого в керамическую ванночку с размером дна 10 × 200 мм. Изменением удельного сопротивления олова при плавлении можно пренебречь.

*Контрольная  
работа*

### Уровень А (рассчитана на 45 мин)

- Во сколько раз изменилось сопротивление металлического проводника, если его длину увеличили в 4 раза, а площадь поперечного сечения в 2 раза? Ответ обоснуйте.
- Определите по графику (рис. 85) сопротивление проводника.

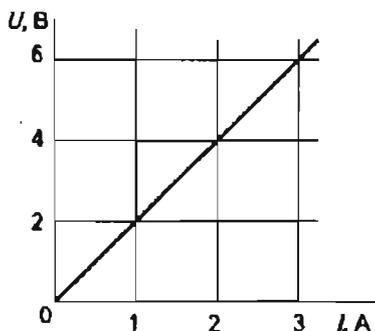


Рис. 85

- Провод из никелина сопротивлением 2 Ом включили в цепь последовательно с источником

тока и амперметром. Амперметр показывает силу тока равную 1,4 А. Какое напряжение покажет вольтметр, если его подключить к концам этого провода? Какой заряд пройдет по проводу за 5 мин? Какую работу совершит источник тока для перемещения этого заряда через провод?

### Уровень Б (рассчитана на 45 мин)

- В цепи, схема которой приведена на рис. 86, при показаниях амперметра 0,25 А, показания вольтметра составляют 2 В. Какую силу тока покажет амперметр при показаниях вольтметра 4 В? За какое время в первом случае через резистор пройдет заряд 2 Кл? Какую работу совершит источник для перемещения этого заряда через резистор?

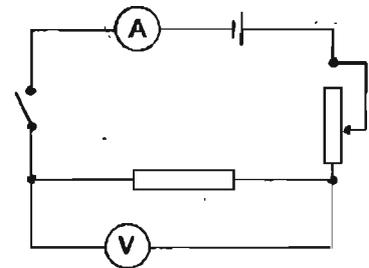


Рис. 86

- Провод из манганинового сплава имеет длину 0,56 м и диаметр 0,4 мм ( $\rho_{\text{спл}} = 0,45 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ). Какова будет сила тока, если напряжение на концах провода будет равно 3 В?
- Расплавится ли алюминий, если его нагреть до такой температуры, что его сопротивление возрастет в 3 раза? Температурный коэффициент удельного сопротивления алюминия 0,004 °С<sup>-1</sup>.

*Творческие  
задания*

### Уровень Б

- Придумайте способ оценки температуры раскаленной вольфрамовой нити лампы накаливания с помощью электротехнических измерений и осуществите его практически.

# Закон Ома для полной цепи

## Изучив эту тему,

- ♦ вы узнаете, как формулируется закон Ома для полной цепи;
- ♦ поймете, как он используется для расчетов параметров электрических цепей;
- ♦ научитесь измерять внутреннее сопротивление и ЭДС источника тока.

## Основные понятия:

Внутреннее сопротивление источника ♦ Ток короткого замыкания

*Конспект.*

*Таблицы..Схемы*

## Закон Ома для полной цепи

Этот закон позволяет вычислить силу тока и напряжение для цепей, содержащих источник тока с известной ЭДС ( $\mathcal{E}$ ). Для цепи, содержащей источник тока с ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $r$ , а также резистор с сопротивлением  $R$  (рис. 87), сила тока в цепи равна ЭДС источника, деленной на сумму сопротивлений внешнего ( $R$ ) и внутреннего ( $r$ ) участков цепи.

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$$

Сопротивление внутреннего участка (внутреннее сопротивление источника тока) характеризует

среду внутри источника тока, по которой вынуждены двигаться заряды, перемещаясь по замкнутой цепи.

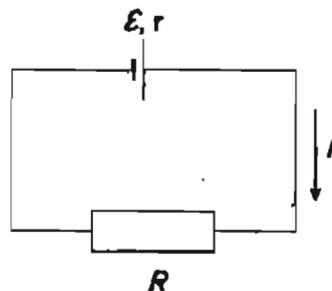


Рис. 87

Внутреннее сопротивление источника зависит от его природы. Гальванические элементы имеют  $r \approx 0,1-1$  Ом, свинцовые аккумуляторы  $0,01-0,1$  Ом, внутренне сопротивление генераторов, разделяющих заряды за счет вращения катушки между магнитами, еще меньше. При малом по сравнению с сопротивлением внешней цепи внутреннем сопротивлении источника ( $r \ll R$ ), закон Ома для полной цепи имеет вид:

$$I \approx \frac{\mathcal{E}}{R}$$

### Короткое замыкание

При уменьшении сопротивления внешнего участка цепи ( $R \rightarrow 0$ ) сила тока в цепи будет определяться только внутренним сопротивлением  $r$  источника тока. Этот ток называют током короткого замыкания:

$$I_{\text{к.з.}} \approx \frac{\mathcal{E}}{r}$$

Реально ситуация короткого замыкания возникает при соединении клемм источника проводником с малым сопротивлением (рис. 88).

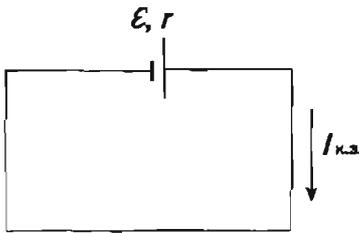


Рис. 88

Даже при замыкании клемм аккумулятора с ЭДС 10 В и малым внутренним сопротивлением, ток короткого замыкания может достигать 100 А. Это может привести к плавлению деталей источника за счет теплового действия тока.

### Плавкий предохранитель

Для прекращения тока, превышающего определенное предельное значение (например, при случайном коротком замыкании), в электрические цепи, питающие электроприборы, на входе последовательно с источником ставят плавкий предохранитель. Он расплавляется за счет теплового действия тока и размыкает цепь раньше, чем будут повреждены более дорогостоящие элементы цепи.

### Напряжение на участке цепи, содержащем источник тока

Если участок цепи, по которому течет ток, содержит источник тока, как показано на рис. 89, то показания вольтметра на концах этого участка, т. е. напряжение на нем, рассчитывается с учетом ЭДС источника:

$$U = \mathcal{E} - Ir$$

Для цепи, представленной на рис. 89, это соотношение легко вывести, принимая во внимание, что напряжение на концах участка, содержащего ЭДС, совпадает с напряжением на внешнем сопротивлении  $R$ , а сила тока рассчитывается по закону Ома для полной цепи.

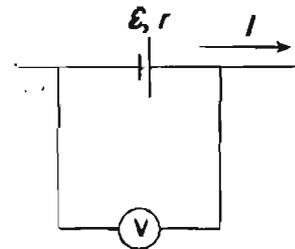


Рис. 89

Законы в виде формул	Обозначения величин, единицы измерения в СИ, справочные значения констант
Закон Ома для полной цепи $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ при $r \ll R$ $I \approx \frac{\mathcal{E}}{R}$	$\mathcal{E}$ — ЭДС источника тока $I$ — сила тока в цепи $R$ — сопротивление внешнего участка цепи
Ток короткого замыкания $I_{\text{к.з.}} \approx \frac{\mathcal{E}}{r}$	$r$ — внутреннее сопротивление источника тока
Напряжение на участке цепи, содержащем источник тока $U = \mathcal{E} - Ir$	

*Лабораторные  
работы*

### 1. Измерение ЭДС источника тока и его внутреннего сопротивления

**Цель:** использовать закон Ома для полной цепи для измерения внутреннего сопротивления источников тока.

**Оборудование:** источник тока ВУ-4 (возможна замена на другой источник, питающийся от сети, или использование бытовых адаптеров для питания калькуляторов и других бытовых приборов, гальванический элемент, вольтметр, амперметр, ключ, реостат, соединительные провода.

#### Ход работы

1. Соберите цепь по схеме, показанной на рис. 90, используя в качестве источника тока выпрямитель ВУ-4.

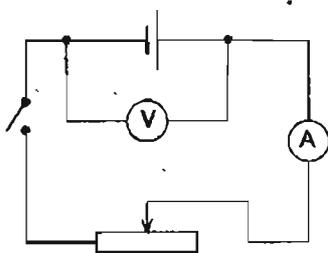


Рис. 90

2. Измерьте ЭДС источника.

При разомкнутом ключе вольтметр, присоединенный параллельно к источнику тока, показывает примерное значение ЭДС источника. Совпадение  $U_v$  и  $\mathcal{E}$  тем выше, чем больше внутреннее сопротивление вольтметра. Действительно,

$$U_v = I_v R_v = \frac{\mathcal{E} R_v}{(R_v + r)} = \mathcal{E} - \frac{\mathcal{E} r}{(R_v + r)} = \mathcal{E} - \frac{\mathcal{E} r}{R_v} \approx \mathcal{E}$$

Если  $\mathcal{E} = 4$  В, а внутреннее сопротивление источника около 1 Ома, то при сопротивлении вольтметра 1000 Ом  $U_v = 4 - \frac{4 \cdot 1}{1000} \approx 3,996$  (В). Это отклонение намного меньше погрешности школьного вольтметра.

3. Перемещая движок реостата, установите ток в цепи  $I \approx 2$  А. Измерьте напряжение  $U$ , показываемое вольтметром в этом случае.

По закону Ома для полной цепи в этом случае  $U = \mathcal{E} - Ir$ , именно поэтому при нарастании тока

в цепи показания вольтметра убывают. Отсюда легко получить:

$$r = \frac{(\mathcal{E} - U)}{I}$$

Рассчитайте внутреннее сопротивление источника  $r$ .

4. Оцените ошибку измерения  $r$ .
5. Проведите аналогичные измерения для гальванического элемента в качестве источника тока. Сделайте выводы о соотношении внутренних сопротивлений двух источников, если точность измерения позволяет это сделать.
6. Оформите выводы из работы с указанием полученных значений ЭДС и внутренних сопротивлений источников.

**\*Примечание.** Об определении ошибок непосредственных измерений (силы тока и напряжения) и расчете ошибки конечного результата ( $\mathcal{E}$  и  $r$ ) необходимо прочитать специальные главы пособий по физическому практикуму, например «Фронтальные лабораторные занятия по физике 7–11» под ред. В. А. Бутова и Г. Г. Никифорова, М.: Просвещение, 1996; «Физика 10» под ред. А. А. Пинского, М.: Просвещение, 1995.

*Самостоятельные  
работы*

#### Уровень А

1. Рассчитайте силу тока в цепи источника с ЭДС равной 9 В и внутренним сопротивлением 1 Ом при подключении во внешнюю цепь резистора с сопротивлением в 3,5 Ом.
2. При подключении к батарейке с ЭДС 1,5 В резистора с сопротивлением 2 Ом сила тока в цепи 0,75 А. Каково внутреннее сопротивление батарейки?
3. В оптимальном режиме работы сопротивление лампы накаливания равно 14 Ом при силе тока 0,25 А. Какова ЭДС источника тока с внутренним сопротивлением 2 Ом, если при подключении к нему лампы накал оптимален?
4. Источник тока с ЭДС 12 В и внутренним сопротивлением 0,5 Ом подключают к реостату, сопротивление которого можно менять от 0 до 6 Ом (рис. 91).

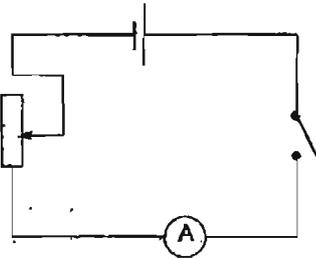


Рис. 91

Постройте график зависимости показаний амперметра от сопротивления реостата.

5. Перегорит ли плавкий предохранитель, рассчитанный на 5А, если им замкнуть клеммы аккумулятора с ЭДС 3В и внутренним сопротивлением 0,1 Ом?

### Уровень Б

6. На гладкий цилиндр из диэлектрика радиусом 5 мм и длиной 5 см напылили слой платины толщиной 14 мкм и уронили цилиндр на клеммы, к которым был подключен источник тока с ЭДС 2, 2В и внутренним сопротивлением 0,01 Ом. Каков будет ток короткого замыкания, если ось цилиндра керамического резистора направлена от одной клеммы источника к другой? Удельное сопротивление платины 0,105 мкОм·м.
7. К источнику тока с внутренним сопротивлением 1 Ом подключили последовательно амперметр и резистор с сопротивлением 2 Ом. При этом амперметр показал 1А. Что покажет амперметр, если использовать резистор сопротивлением 3 Ом?
8. В цепи, изображенной на схеме (рис. 92), вольтметр показывает 3 В, а амперметр — 0,5 А. При силе тока 1 А вольтметр показывает 2,5 В. Каковы ЭДС и внутреннее сопротивление источника?

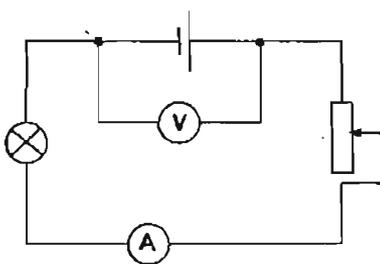


Рис. 92

9. В электрической цепи, представленной на рис. 93, при разомкнутом ключе вольтметр показывает 6 В, при замкнутом ключе — 4,5 В. Каковы ЭДС и внутреннее сопротивление источника, если резистор имеет сопротивление 2 Ом?

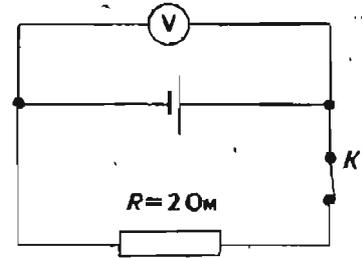


Рис. 93

10. Плавкий предохранитель с малым сопротивлением, рассчитанный на 5А, включен между источником тока с ЭДС 220В ( $r_{\text{внутр}}$  мало) и розеткой, присоединенной к источнику алюминиевыми проводами общей длиной 20 м и диаметром 0,5 мм. Перегорит ли предохранитель, если в розетку вставить два графитовых стержня диаметром 1 мм и длиной 10 см, а затем положить поперек такой же стержень? Расстояние между отверстиями розетки равно 3 см, внутренним сопротивлением источника пренебречь. Удельные сопротивления алюминия и графита считать равными 0,028 и 10 мкОм·м, соответственно.
11. Постройте график зависимости напряжения, показываемого вольтметром, от сопротивления реостата, включенных по схеме, показанной на рис. 94. Величины  $\mathcal{E}$  и  $r$ , считать известными.

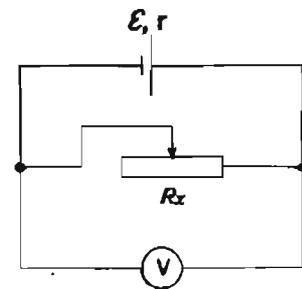


Рис. 94

*Контрольная  
работа***Уровень А** (рассчитана на 45 мин)

1. ЭДС источника равна 9 В, внутреннее сопротивление 0,5 Ом. Определите силу тока в цепи при подключении к нему резистора с сопротивлением 4 Ом.
2. Нарисуйте электрическую схему для определения ЭДС источника и его внутреннего сопротивления. Какие величины необходимо для этого измерить согласно вашей схеме?
3. При подключении к источнику с внутренним сопротивлением 1 Ом внешнего сопротивления 4 Ом, по цепи проходит ток 0,2 А. Какова будет сила тока при коротком замыкании клемм источника?

**Уровень Б** (рассчитана на 45 мин)

1. Батарея, ЭДС которой 16 В, замкнута на резистор сопротивлением 6 Ом. Сила тока в цепи 2 А. Каково внутреннее сопротивление источника?
2. К концам стеклянной трубки длиной 75 см и внутренним диаметром 1 мм припаяны два электрода. Чему будет равна сила тока в трубке, если ее заполнить ртутью и подсоединить к гальваническому элементу с ЭДС 1,5 В и внутренним сопротивлением 1 Ом? Удельное сопротивление ртути  $0,96 \cdot 10^{-6}$  Ом·м.

3. В цепь, представленную на схеме (рис. 95), включен реостат с катушкой из провода, сопротивление которого равно 6 Ом. Длина катушки реостата 12 см. ЭДС и внутреннее сопротивление источника равны соответственно 12 В и 2 Ом. Постройте график зависимости силы тока в цепи от положения движка реостата.

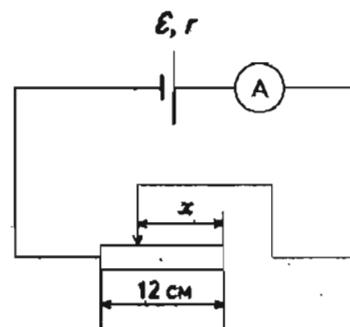


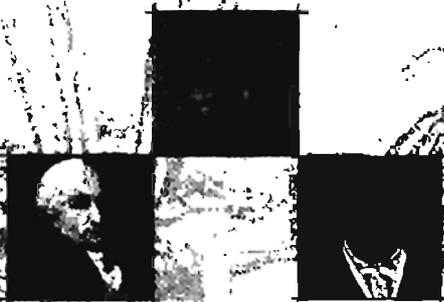
Рис. 95

*Творческие  
задания***Уровень Б**

1. Предложите свои или проанализируйте встречающиеся в этой главе способы измерения ЭДС источника тока и его внутреннего сопротивления. Оцените ошибки результатов, получаемых тем или иным методом, при одинаковом классе точности используемых приборов. Реализуйте наиболее точный из них для экспериментального определения этих величин.



# Расчет сопротивлений, токов и напряжений



Последовательное  
соединение

Параллельное соединение

## Изучив эту тему,

- ♦ вы узнаете, как измерять ток, протекающий через отдельные элементы участка цепи и через весь участок, а также напряжение на отдельных элементах участка цепи и на всем участке;
- ♦ научитесь собирать электрические цепи по их схемам, составлять схемы реальных цепей, выполнять расчеты электрического сопротивления цепей путем их разбиения на участки с последовательным и параллельным соединением элементов

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

В электрических цепях с самым причудливым соединением элементов зачастую можно выделить участки, в которых элементы соединены последовательно и параллельно. Такие способы соединения элементов цепи уже встречались в предыдущих главах (последовательное соединение амперметра и параллельное подключение вольтметра к участку цепи, батареи конденсаторов). Здесь мы остановимся на основных закономерностях протекания тока в таких участках. В качестве элементов цепи для простоты будем рассматривать, в основном, резисторы.

## Основные понятия:

Последовательное соединение элементов электрической цепи ♦ Параллельное соединение элементов

## Последовательное соединение элементов

Это соединение отличается наглядностью: выход предыдущего элемента связан со входом последующего. Но оно имеет еще одну особенность. Ток, протекающий через все элементы, одинаков:

$$I_1 = I_2 = \dots = I_N = I.$$

Поскольку для каждого резистора можно применить закон Ома для участка цепи, то напряжение на каждом из резисторов пропорционально сопротивлению каждого резистора:

$$U_1 = IR_1; \quad U_2 = IR_2; \quad \dots \quad U_N = IR_N.$$

Напряжение на концах всего участка цепи:

$$U_{1N} = U_1 + U_2 + \dots + U_N = I(R_1 + R_2 + \dots + R_N) = IR_{1N}.$$

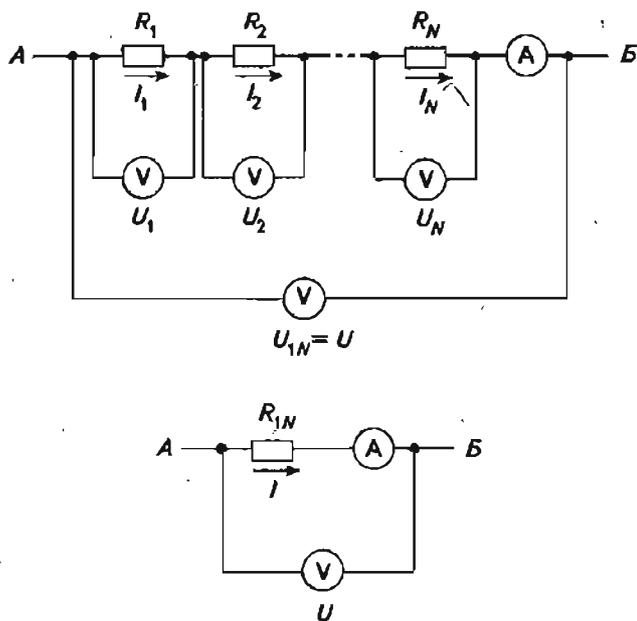


Рис. 96

Величину  $R_{1N}$  называют **общим сопротивлением участка цепи** или **эквивалентным сопротивлением участка**. При замене всего участка на резистор с эквивалентным сопротивлением во всей цепи вне данного участка все токи и напряжения останутся прежними.

### Параллельное соединение элементов

При таком способе соединения элементов участка цепи (рис. 97) все входные клеммы элементов соединены в одной точке А, так же как выходные клеммы — в одной точке В. Ясно, что при этом напряжение на всех резисторах одинаково:

$$U_1 = U_2 = \dots = U_N = U_{1N} = U.$$

Ток, подходя к такому участку цепи, разветвляется на  $N$  потоков. Из закона сохранения заряда следует, что при этом:

$$I_1 + I_2 + \dots + I_N = I_{1N} = I.$$

Поскольку для каждого резистора из закона Ома следует:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}; \quad \dots \quad I_N = \frac{U}{R_N},$$

получаем:

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_N} = U \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N} \right).$$

Поскольку по закону Ома  $\frac{I}{U} = \frac{1}{R_{1N}}$ , где  $R_{1N}$  — сопротивление всего участка цепи, верно следующее соотношение для вычисления эквивалентного сопротивления участка цепи:

$$\frac{1}{R_{1N}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}.$$

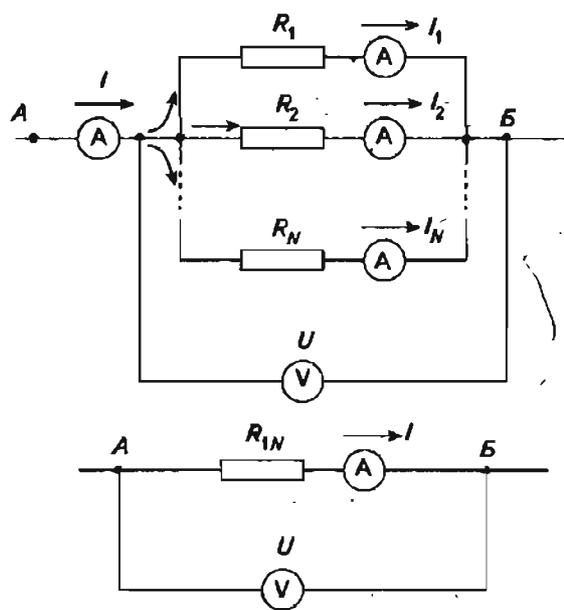


Рис. 97

### Метод эквивалентных замен для вычисления эквивалентного сопротивления участка цепи

На рис. 98 представлен участок цепи, в котором просматриваются блоки, где резисторы соединены последовательно или параллельно.

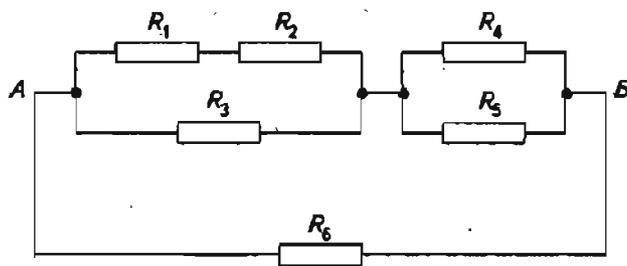


Рис. 98

Так, резисторы  $R_1$  и  $R_2$  соединены последовательно, резисторы  $R_4$  и  $R_5$  — параллельно, а резистор  $R_6$  присоединен параллельно к блоку, содержащему все остальные резисторы. В таком случае для вычисления сопротивления всего участка следует заменять эквивалентными сопротивлениями те блоки, в которых способ соединения элементов очевиден, постепенно упрощая цепь. Так, заменяя  $R_1$  и  $R_2$  на  $R_{12} = R_1 + R_2$ , а  $R_4$  и  $R_5$  на  $R_{45} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5}$ , получим схемы, представленные на рис. 99 а.

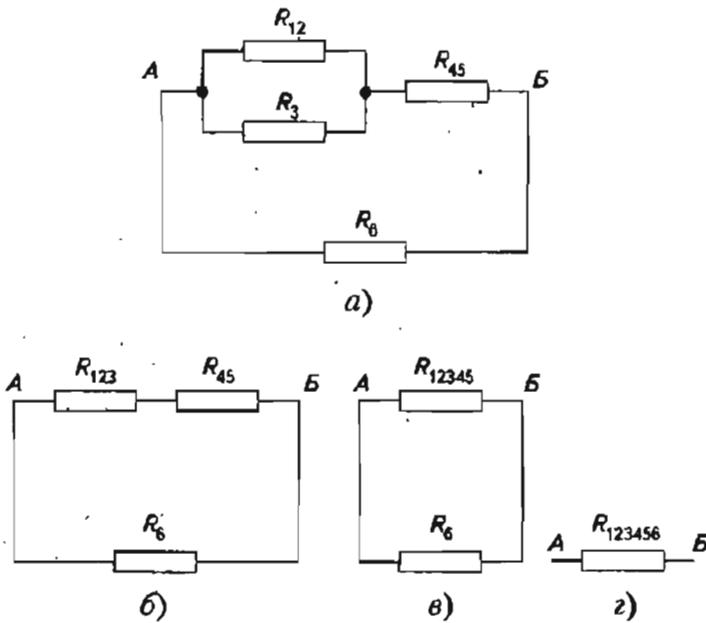


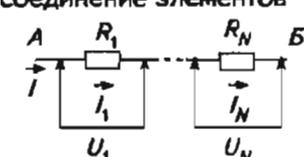
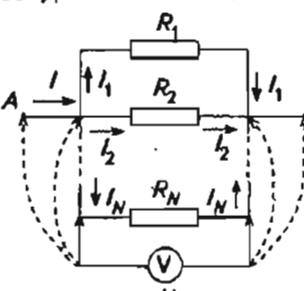
Рис. 99

Замена  $R_3$  и  $R_{12}$  на  $R_{123}$  приводит к эквивалентной схеме (рис. 99 б).

Далее заменяем последовательно соединенные сопротивления  $R_{123}$  и  $R_{45}$  на эквивалентное сопротивление  $R_{12345}$  (рис. 99 в), что делает очевидной замену двух параллельных резисторов на один  $R_{123456}$ , эквивалентный всему исходному участку цепи (рис. 99 з).

**Метод соединения и разъединения точек цепи с одинаковым потенциалом для упрощения расчетов**

В ряде случаев блоки с параллельным и последовательным соединением цепи в явном виде не просматриваются, однако после сведения в одну точку тех точек цепи, которые обладают одинаковым потенциалом (например, соединенных проводом с

Законы в виде формул	Обозначения величин, единицы измерения в СИ, справочные значения констант
<p>Последовательное соединение элементов</p>  $I_1 = I_2 = \dots = I_N = I$ $U_1 = IR_1; U_2 = IR_2; \dots$ $U_N = IR_N$ $U_{AB} = U_1 + U_2 + \dots + U_N$ $R_{AB} = R_1 + R_2 + \dots + R_N$	<p><math>I</math> — сила тока, на участке цепи <math>AB</math></p> <p><math>I_1; I_2; \dots; I_N</math> — сила тока, через 1, 2, ... <math>N</math>-ый резисторы</p> <p><math>U_1; U_2; \dots; U_N</math> — напряжения на 1, 2, ... <math>N</math>-ом резисторах</p> <p><math>U_{AB}</math> — напряжение на концах участка цепи <math>AB</math></p>
<p>Параллельное соединение элементов</p>  $U_1 = U_2 = \dots = U_N = U_{AB}$ $I_1 + I_2 + \dots + I_N = I$ $I_1 = \frac{U}{R_1}; I_2 = \frac{U}{R_2}; \dots; I_N = \frac{U}{R_N}$ $\frac{1}{R_{AB}} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N} \right)$	<p><math>R_{AB}</math> — сопротивление участка <math>AB</math></p>

малым сопротивлением), или искусственное разъединение таких точек, превращает схему в совокупность блоков, сопротивление которых легко рассчитать. Например, точки  $B, C, D$  на схеме (рис. 100 а) соединены проводом, поэтому обладают одинаковым потенциалом. Сведение их в точку  $B$  делает расчет сопротивления участка очевидным (рис. 100 б).

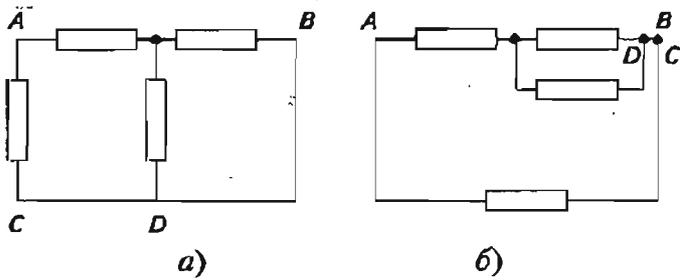


Рис. 100

В схеме (рис. 101 а), наоборот, удобно точку  $O$  разделить на две точки  $O_1$  и  $O_2$  (рис. 101 б), после чего расчет сопротивления между участками цепи существенно упрощается (рис. 101 в).

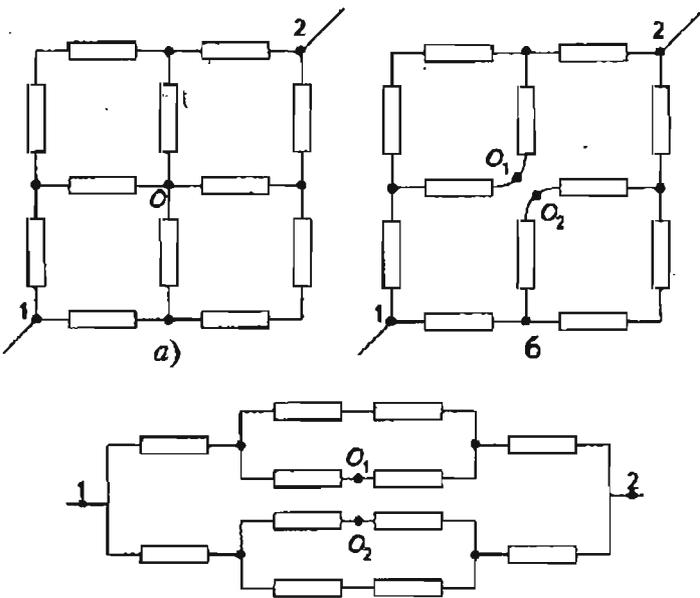


Рис. 101

**Последовательность решения задач на расчет токов и напряжений в цепи с источником тока (с использованием закона Ома для полной цепи)**

Решение прямой задачи расчета токов и напряжений в элементах цепи, ток в которой создается источником тока с ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $r$  можно провести по следующему плану:

- 1) одним из вышеописанных способов рассчитать общее сопротивление внешней цепи;
- 2) рассчитать по закону Ома для полной цепи общую силу тока в цепи;

- 3) разделить цепь на соединенные последовательно блоки, в которых элементы соединены параллельно. На основе законов для токов и напряжений на участке цепи с параллельными элементами рассчитать силу тока в параллельных ветвях каждого блока;
- 4) умножая силу тока на участке на сопротивление этого участка, найти нужные значения напряжений на участках цепи.

*Лабораторные работы*

**1. Изучение распределения токов и напряжений в резисторах, соединенных последовательно и параллельно**

**Цель:** закрепить понятие сопротивления участка цепи, проверить экспериментально законы распределения токов и напряжений в элементах цепи при параллельном и последовательном соединении.

**Оборудование:** источник тока, амперметр, вольтметр, ключ, три резистора с разным сопротивлением (примерно 1, 2 и 3 Ом), соединительные провода, реостат.

**Ход работы**

1. Собрав схему 1, как показано на рис. 102, измерить сопротивление каждого резистора по отдельности.

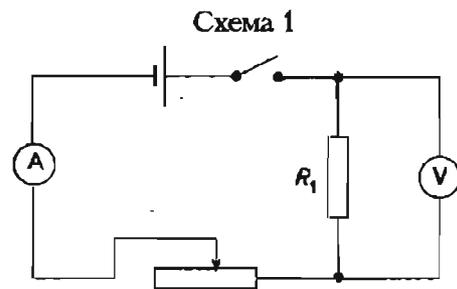


Рис. 102

2. Собрать схему 2 (рис. 103) и, измерив напряжение между точками  $A$  и  $D$ , а также силу тока в цепи, рассчитать сопротивление участка цепи  $AD$ . Убедиться, что сопротивление участка с точностью до ошибок измерений совпадает с суммой сопротивлений резисторов.

Схема 2

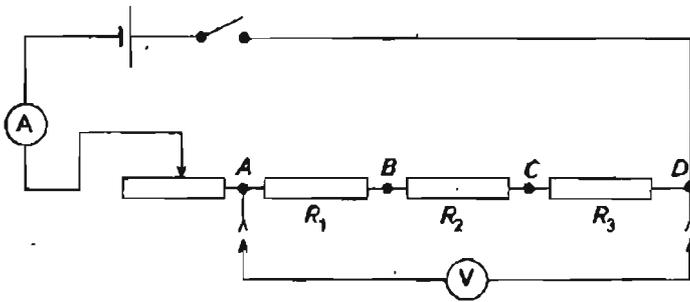


Рис. 103

**У к а з а н и е.** Присоедините провода с наконечниками к вольтметру и измеряйте напряжение между точками цепи, прикасаясь наконечниками только к соответствующим точкам схемы, не присоединяя вольтметра.

3. Измерив напряжение на участках *AB*, *BC*, *CD*, убедиться, что напряжение на участке каждого из последовательно соединенных элементов цепи пропорционально сопротивлению данного элемента, а сумма напряжений на трех участках совпадает с напряжением на концах общего участка.

4. Собрать схему 3 (рис. 104) и, измерив силу тока и напряжение между точками *A* и *B*, рассчитать сопротивление участка цепи из трех параллельно соединенных резисторов. Убедиться, что оно совпадает с сопротивлением, рассчитанным по формуле  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$ .

Схема 3

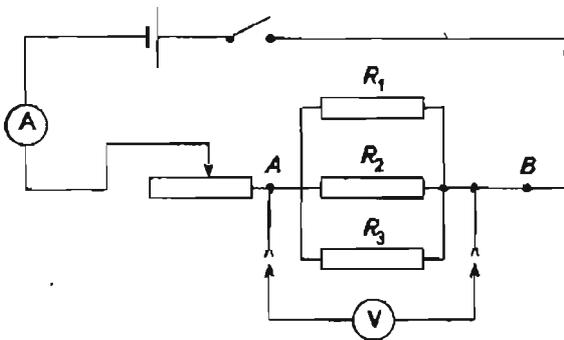


Рис. 104

5. Собрать схему, аналогичную изображенной на рис. 105, измерить силу тока в каждом резисторе. Убедиться в том, что сумма токов через ре-

зисторы в пределах точности измерений совпадает с суммарным током.

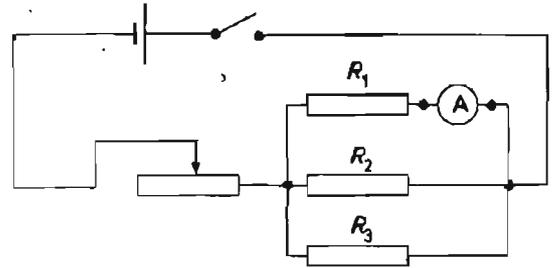


Рис. 105

6. При выполнении каждого пункта записывайте результаты измерений, а в конце работы сформулируйте выводы по каждому пункту работы.

*Самостоятельная работа*

**Обучающий тест**

**Уровень А**

1. Как изменится сопротивление проводника, если его разрезать на две равные части и соединить эти части параллельно?

- А. Не изменится.
- Б. Уменьшится в 2 раза.
- В. Уменьшится в 4 раза.
- Г. Увеличится в 2 раза.

2. Определите общее сопротивление электрической цепи (рис. 106), в которой  $R_1 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 4 \text{ Ом}$ .

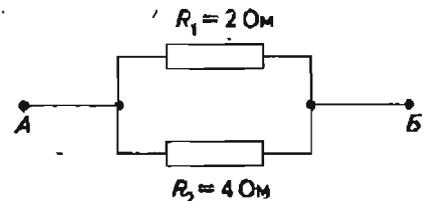


Рис. 106

- А.  $\frac{4}{3}$  Ом.
- Б. 6 Ом.
- В. 3 Ом.
- Г.  $\frac{3}{4}$  Ом.

3. Два резистора с сопротивлениями  $R_1 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 20 \text{ Ом}$  соединены последовательно. Чему равно отношение напряжений  $\frac{U_1}{U_2}$  на этих резисторах?

- А. 1.                       Б.  $\frac{1}{2}$ .

В. 2.

Г. Среди ответов А–В нет правильного.

4. Чему равна сила тока в общей части электрической цепи (рис. 107)?

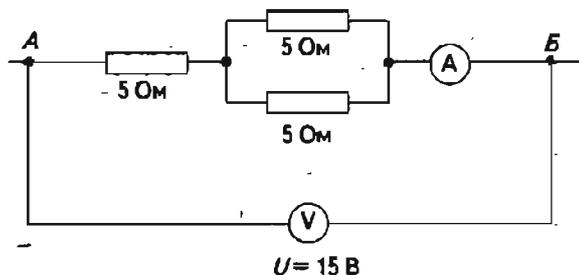


Рис. 107

А. 0,67 А.                       Б. 0,5 А.

В. 1 А.                               Г. 2 А.

5. Рассчитайте общее сопротивление цепи (рис. 108) между точками 1–2. Сопротивление каждого элемента цепи равно 1 Ом.

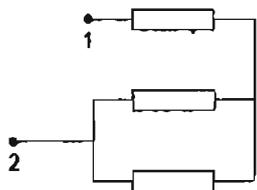


Рис. 108

А. 3 Ом.                               Б. 2 Ом.

В. 1,5 Ом.                               Г.  $\frac{1}{3}$  Ом.

6. Сила тока через сопротивление 3 Ом (рис. 109) равна  $I_3 = 3$  А. Определите силу тока  $I_1$  и  $I_2$  в параллельных ветвях с сопротивлениями 1 и 2 Ом, соответственно.

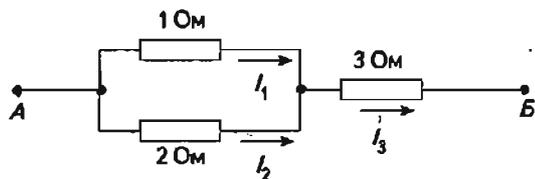


Рис. 109

А. 1 А и 2 А.                       Б. 2 А и 1 А.

В. 1,5 А и 1,5 А.                       Г. 3 А и 3 А.

7. Что показывает вольтметр  $V_1$  (рис. 110), если вольтметр  $V_2$  показывает 10 В?

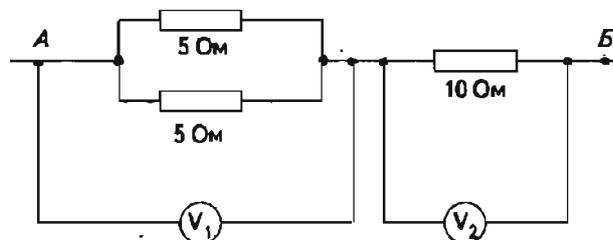


Рис. 110

А. 10 В.

Б. 5 В.

В. 3,3 В.

Г. 2,5 В.

### Уровень Б

1. Как изменится сила тока, проходящего в проводнике, если уменьшить в 2 раза напряжение на его концах, а длину проводника увеличить в 2 раза?

А. Не изменится.

Б. Уменьшится в 2 раза.

В. Уменьшится в 4 раза.

Г. Увеличится в 2 раза.

2. Определите общее сопротивление электрической цепи, представленной на рис. 111. Сопротивления резисторов 4, 6, 12 Ом соответственно.

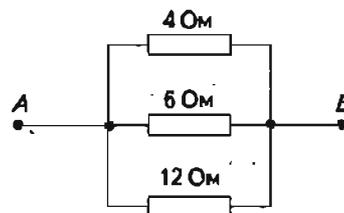


Рис. 111

А.  $\frac{1}{2}$  Ом.

Б. 2 Ом.

В.  $\frac{22}{3}$  Ом.

Г. 22 Ом.

3. Два резистора с сопротивлениями  $R_1 = 5$  Ом,  $R_2 = 10$  Ом соединены параллельно. Чему равно отношение сил токов  $\frac{I_1}{I_2}$ , протекающих через эти резисторы?

- А. 1.
- Б.  $\frac{1}{2}$ .
- В. 2.
- Г. Среди ответов А–В нет правильного.

4. Чему равна сила тока, проходящего в общей части электрической цепи (рис. 112), если вольтметр показывает напряжение, равное 2 В?

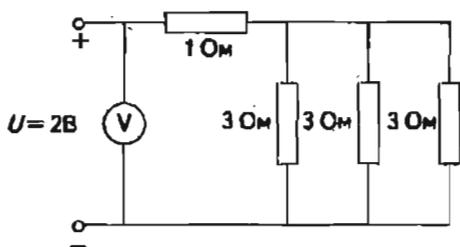


Рис. 112

- А. 0,2 А.
- Б. 0,66 А.
- В. 1 А.
- Г. 2 А.

5. Каково общее сопротивление участка цепи между точками А–В (рис. 113)? Сопротивление каждого элемента цепи равно 1 Ом.

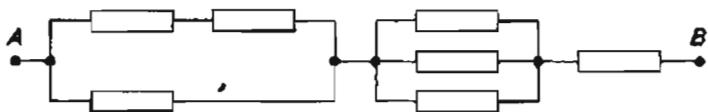


Рис. 113

- А. 7 Ом.
- Б.  $\frac{17}{6}$  Ом.
- В. 2 Ом.
- Г. 1 Ом.

6. Сила тока в ветви с сопротивлением 3 Ом (рис. 114) равна 2 А. Чему равна сила тока в ветви с сопротивлением 2 Ом?

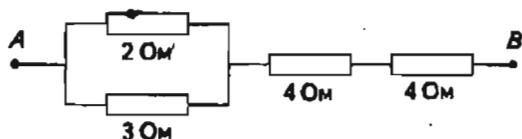


Рис. 114

- А. 2 А.
- Б. 3 А.
- В. 4 А.
- Г.  $\frac{4}{5}$  А.

7. Что показывает вольтметр  $V_1$  (рис. 115), если вольтметр  $V_2$  показывает 10 В?

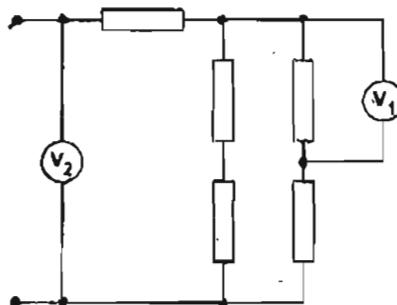


Рис. 115

- А. 10 В.
- Б. 5 В.
- В. 2,5 В.
- Г. 0,2 В.

*Тренировки по  
решению задач*

**Уровень А**

1. Рассчитайте сопротивление изображенных на рис. 116 участков цепи, если сопротивление каждого резистора 2 Ом.

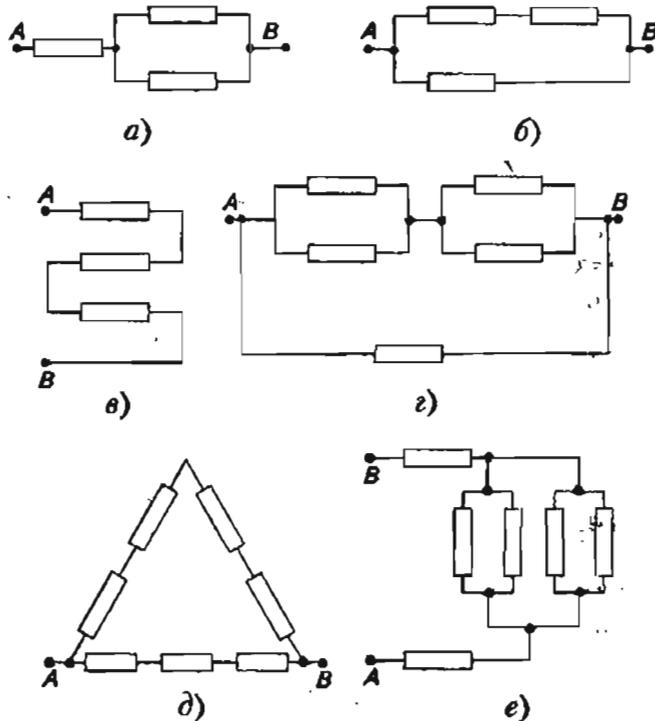


Рис. 116

2. Амперметр в цепи на схеме (рис. 117) показывает 2 А. Что показывают вольтметры  $V_1, V_2, V_3$ ?

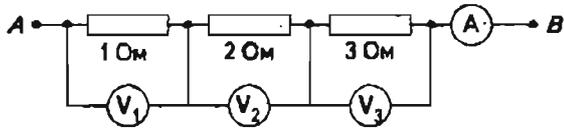


Рис. 117

3. Амперметр  $A_1$  в цепи (рис. 118) показывает 3 А. Что показывают вольтметр  $V$  и амперметр  $A_2$ ?

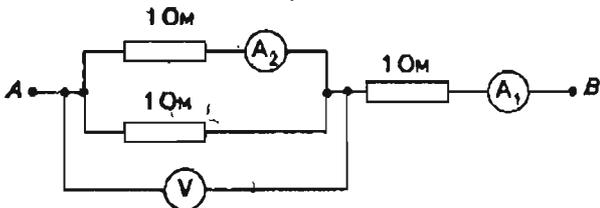


Рис. 118

4. Вольтметр  $V_1$  (рис. 119) показывает 4 В. Что показывает амперметр  $A$  и вольтметр  $V_2$ ?

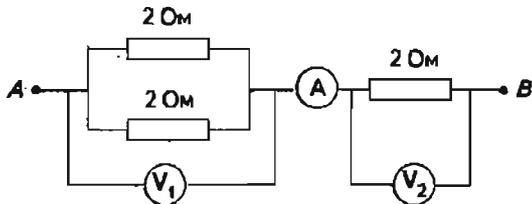


Рис. 119

5. К источнику тока с ЭДС 5 В и внутренним сопротивлением 1 Ом присоединены последовательно три резистора с сопротивлениями 1, 2 и 6 Ом. Какова сила тока в источнике в каждом из резисторов?

6. К источнику тока с ЭДС 5 В и внутренним сопротивлением 0,5 Ом присоединены параллельно два резистора с сопротивлениями 4 и 4 Ом. Какова сила тока в источнике в каждой из ветвей?

**Уровень Б**

**Пример решения задачи**

К источнику тока с ЭДС 5 В и внутренним сопротивлением 0,1 Ом присоединены параллельно два резистора с сопротивлениями 4 и 6 Ом. Какова сила тока в источнике в каждом из резисторов? Какое напряжение покажет вольтметр, если его подключить к клеммам источника тока?

Дано:  $\mathcal{E} = 5$  В;  
 $r = 0,1$  Ом;  
 $R_1 = 4$  Ом;  
 $R_2 = 6$  Ом;  
 $I = ?$   $I_1 = ?$   $I_2 = ?$   $U = ?$

Решение. Нарисуем схему цепи:

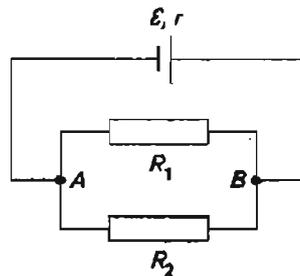


Рис. 120

Рассчитаем сопротивление резистора, эквивалентного  $R_1$  и  $R_2$ :

$$\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{4} + \frac{1}{6} = \frac{10}{24};$$

$$R_{12} = \frac{24}{10} = 2,4 \text{ Ом.}$$

Исходную схему заменим эквивалентной:

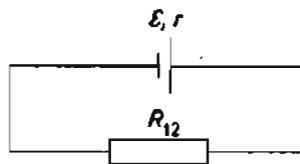


Рис. 121

Применим закон Ома для полной цепи, чтобы вычислить силу тока в цепи с источником тока до точек разветвления цепи  $A$  и  $B$ .

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{12} + r} = \frac{5}{(2,4 + 0,1)} = 2 \text{ (А)};$$

Значит, вольтметр при подключении к точкам  $A$  и  $B$  цепи покажет напряжение:

$$U = IR_{12} = 2 \cdot 2,4 = 4,8 \text{ (В).}$$

Возвращаясь к первой схеме, можно сказать, что теперь легко рассчитать силу тока через резисторы, воспользовавшись законом Ома для участка цепи:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{4,8}{4} = 1,2 \text{ (А)};$$

$$I_2 = \frac{U}{R_{12}} = \frac{4,8}{6} = 0,8 \text{ (A)}.$$

Как и следовало ожидать:  $I = I_1 + I_2$ .

Ответ: 2 А; 1,2 А; 0,8 А; 4,8 В.

7. Рассчитайте сопротивление следующих участков цепи, представленной на рис. 122.

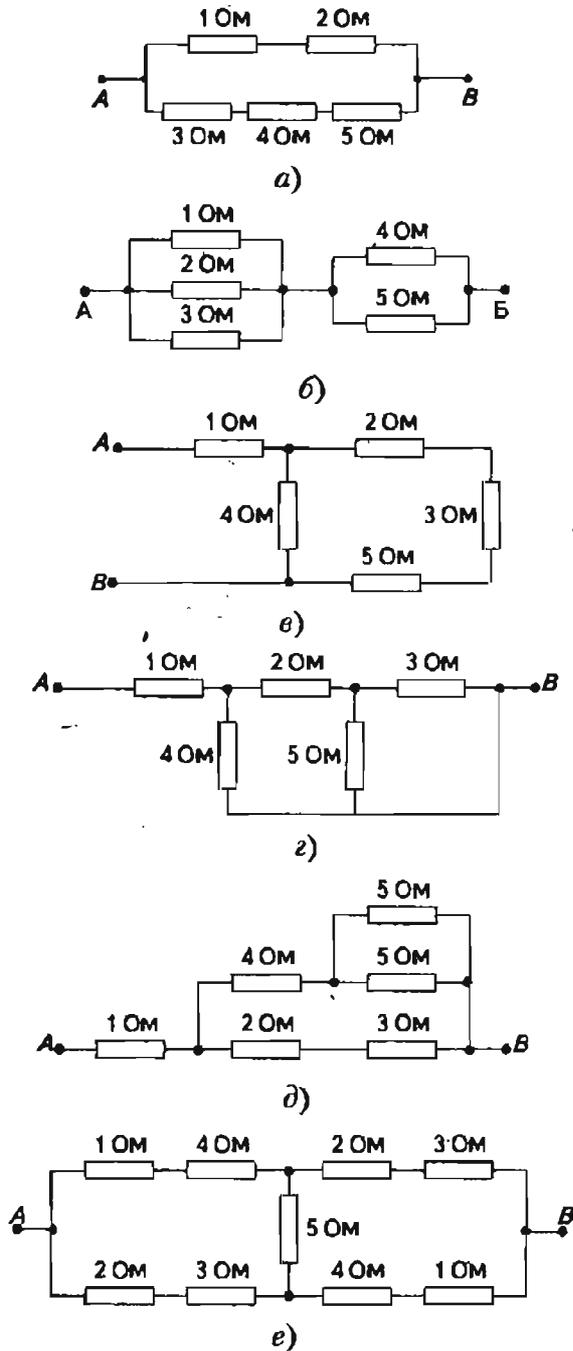


Рис. 122

8. К источнику тока с ЭДС 4,2 В и внутренним сопротивлением 0,2 Ом присоединены параллельно два резистора с сопротивлениями 2 и 3 Ом. Какова сила тока в источнике тока и в каждом из резисторов? Какое напряжение покажет вольтметр, если его подключить к клеммам источника тока?
9. По приведенным на рис. 123 показаниям вольтметров и амперметров рассчитайте неизвестные показания остальных электроизмерительных приборов.

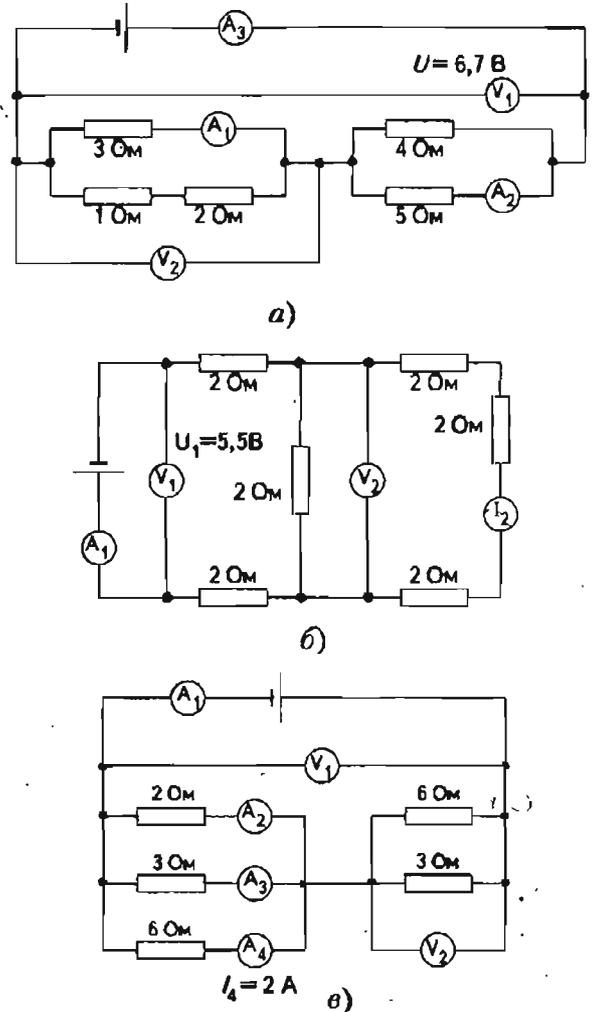


Рис. 123

10. Два провода из константана ( $\rho_{\text{ал}} = 50 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ) и нихрома ( $\rho_{\text{ал}} = 100 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ) одинакового диаметра и длины соединяют сначала последовательно, а затем параллельно и этот блок подключают к одному и тому же источнику тока. Как будет различаться сила тока через ис-

точник в первом и втором случае? Через константановую проволоку в первом и втором случае? Внутренним сопротивлением источника пренебречь.

**Уровень В**

11. Рассчитайте сопротивление участков цепи на рис. 124, если каждое из звеньев имеет сопротивление  $r$ .

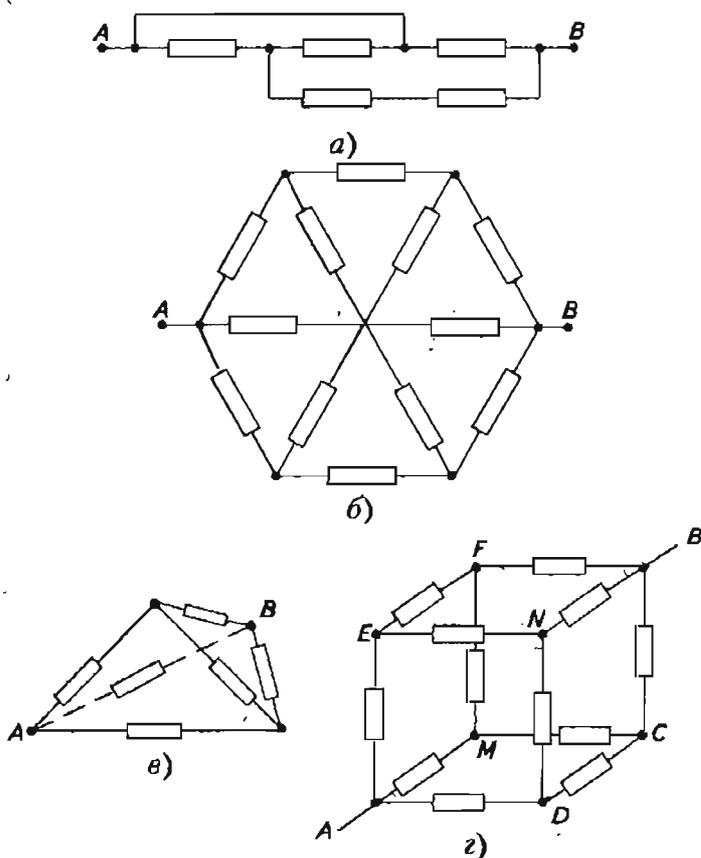


Рис. 124

**Пример решения задачи**

Определить сопротивление участка  $AB$  для схемы, представленной на рис. 124 г. Сопротивления всех резисторов равны.

1 способ. Обозначим вершины куба  $A, M, C, D, E, F, M, B, N$ . В силу симметрии картины растекания токов можно утверждать, что ток  $I$ , втекающий в участок цепи в точке  $A$ , разделяется на три одинаковых потока по  $\frac{I}{3}$ . В вершине  $E$  происходит столь же симметричное растекание тока  $\frac{I}{3}$  на два потока по  $\frac{I}{6}$ . То же самое происходит в вершинах

$M$  и  $D$ , поэтому по ребрам  $MF, MC, DN, DC$  также текут токи  $\frac{I}{6}$ . В вершинах  $F, N$  и  $C$  происходит сливание этих токов, и по ребрам  $FB, NB, CB$  текут токи  $\frac{I}{3}$ . Напряжение (разность потенциалов) между точками  $A$  и  $B$  складывается из суммы напряжений на ребрах  $AE, EN$  и  $NB$ , например:

$$\varphi_B - \varphi_A = (\varphi_B - \varphi_N) + (\varphi_N - \varphi_E) + (\varphi_E - \varphi_A) \Rightarrow$$

$$IR_{AB} = \frac{Ir}{3} + \frac{Ir}{6} + \frac{Ir}{3} = \frac{5Ir}{6}$$

Поэтому:  $R_{AB} = \frac{5r}{6}$ .

2 способ. В силу симметрии растекания токов потенциалы точек  $E, D, M$  равны между собой, поэтому их можно соединить в одну точку: аналогично можно соединить точки  $F, N, C$ . Тогда участок цепи получается состоящим из трех последовательно соединенных блоков, в каждом из которых резисторы соединены параллельно (рис. 125).

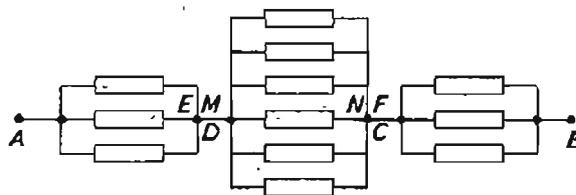


Рис. 125

Тогда сопротивление всего участка будет равно:

$$R_{AB} = \frac{r}{3} + \frac{r}{6} + \frac{r}{3} = \frac{5r}{6}$$

Ответ:  $\frac{5r}{6}$ .

*Контрольная работа*

**Уровень А** (рассчитана на 45 мин)

1. Три резистора с электрическими сопротивлениями 2, 3, 4 Ом соединены последовательно. Каким одним эквивалентным резистором можно заменить эти три в случае их перегорания?
2. Нарисуйте схему параллельного соединения трех одинаковых лампочек, подключенных к источнику тока. Какова сила тока в каждой из ламп, если сила тока в источнике 2 А?

3. Каково сопротивление участка цепи  $AB$  (рис. 126), если сопротивления всех ламп равны  $R$ ?

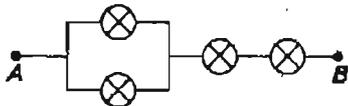


Рис. 126

4. Вольтметр (рис. 127) показывает 3 В. Что показывает амперметр?

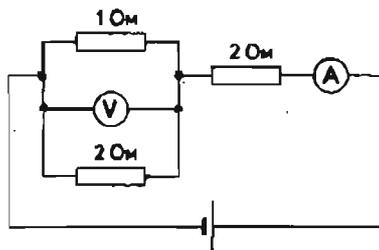


Рис. 127

5. Рассчитайте ток через резистор  $R_1$ , если ЭДС источника 4,5 В, внутреннее сопротивление 0,5 Ом;  $R_1 = 1$  Ом;  $R_2 = 3$  Ом. Какое напряжение покажет вольтметр  $V$  (рис. 128)?

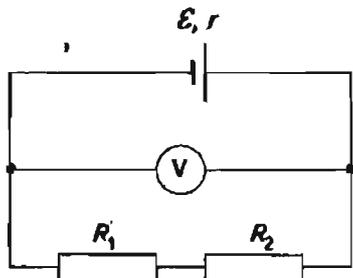


Рис. 128

**Уровень Б** (рассчитана на 45 мин)

1. Определите общее сопротивление электрической цепи (рис. 129), если сопротивления резисторов  $R_1, R_2, R_3$  равны соответственно 2, 12 и 24 Ом.

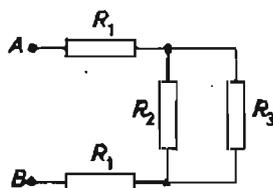


Рис. 129

2. Два резистора с сопротивлениями  $R_1 = 5$  Ом;  $R_2 = 10$  Ом соединены последовательно. Чему равны отношения  $\frac{I_1}{I_2}$  и  $\frac{U_1}{U_2}$  для этих резисторов?
3. Чему равны показания амперметров и вольтметров в цепи (рис. 130), если вольтметр  $V_1$  показывает 6 В?

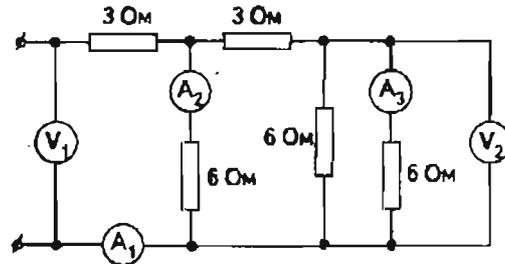


Рис. 130

4. Рассчитайте общее сопротивление цепи, представленной на рис. 131, если сопротивление каждого отрезка равно 1 Ом.

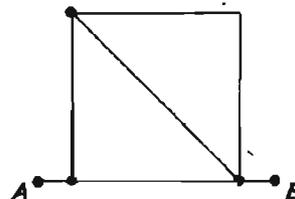


Рис. 131

5. Три батарейки с ЭДС 2 В и внутренними сопротивлениями по 0,5 Ом каждая соединили с резисторами по 5 Ом согласно схеме (рис. 132). Какова сила тока в резисторах и в батарейках?

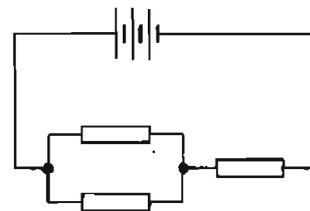


Рис. 132

*Творческие задания*

1. Рассчитайте сопротивление конического металлического проводника при подключении источника тока к вершине конуса и центру основания конуса. Удельное сопротивление материала, высота конуса и радиус основания известны. На

основание конуса нанесен слой металла с малым сопротивлением.

2. Рассчитайте сопротивление сетки (рис. 133), включенной в цепь точками *A* и *B*, если внешний контур сетки сделан из проводника с большой проводимостью, а каждое звено имеет сопротивление  $r$ .

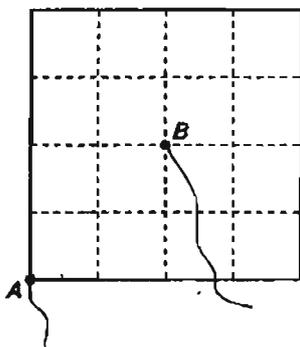


Рис. 133

3. Рассчитайте сопротивление бесконечно длинной цепочки, представленной на рис. 134.

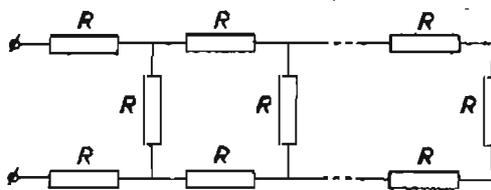
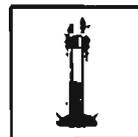
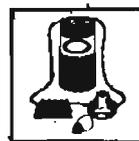


Рис. 134

**У к а з а н и е.** Сопротивление бесконечно длинной цепочки не меняется при добавлении к ней еще одного звена.



# Тепловое действие тока (закон Джоуля—Ленца)



## Изучив эту тему,

- вы узнаете, как можно рассчитать работу силы тока на участке цепи и количество тепла, выделяющегося на элементе цепи за данный промежуток времени;
- научитесь формулировать закон Джоуля—Ленца;
- сможете применять свои знания для анализа характеристик электронагревательных приборов по их техническим данным

## Основные понятия:

Работа тока • Мощность тока

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

## Работа тока

При введении понятия «напряжение» ( $U$ ) мы определили его как отношение работы  $A$ , совершаемой электростатическими силами при перемещении заряда по участку цепи, к перемещаемому заряду  $q$ . Итогом совершения работы может быть: нагревание проводника, движение его в магнитном поле, осуществление химической реакции, излучение электромагнитных волн.

Если единственным итогом прохождения тока по участку цепи является выделение тепла на нем, то вся работа  $A$  электрического поля равна выделившемуся количеству теплоты  $Q$ :

$$A = Q = U \cdot q = U \cdot I \cdot t,$$

так как заряд, прошедший через проводник, связан с силой тока  $I$  в проводнике и временем  $t$  перемещения заряда.

## Закон Джоуля—Ленца

Используя закон Ома для участка цепи, легко выразить количество выделяющегося на участке цепи теплоты через сопротивление участка  $R$ .

$$Q = I^2 R t$$

Это соотношение было получено экспериментально независимо друг от друга Дж. Джоулем и Э. Ленцем и носит их имя.

**Количество теплоты, выделяющееся в источнике тока**

Если ток в участке цепи существует благодаря работе источника тока, имеющего внутреннее сопротивление  $r$ , то в этом источнике также выделяется определенное количество теплоты.

$$Q_{\text{ист}} = I^2 r t$$

**Мощность тока и мощность электронагревательного прибора**

Для участка цепи, на котором работа тока затрачивается только на нагревание элемента цепи, можно рассчитать количество теплоты, выделившееся на нем за единицу времени.

$$P = I^2 R$$

В случае включения в цепь электронагревательных приборов эту величину можно назвать мощностью электронагревательного прибора.

Если напряжение на концах нагреваемого элемента цепи поддерживается постоянным и равным  $U$ , то:

$$P = IU.$$

*Лабораторные работы***1. Изучение устройства лампы накаливания и выделения теплоты на ней**

**Цель:** ознакомление с техническим устройством, использующим тепловое действие тока, и его электрическими характеристиками.

**Оборудование:** лампа накаливания, собирающая линза (лупа), линейка.

**Ход работы**

1. Рассмотрите лампу накаливания, зарисуйте ее схему и путь, по которому движется ток при подключении лампы к источнику постоянного тока.
2. Исходя из этого, сделайте вывод: сопротивление какой детали токопроводящей части лампы наибольшее.
3. Запишите данные об электрических характеристиках лампы, приведенные на стеклянной колбе

Законы в виде формул	Обозначения величин, единицы измерения в СИ, справочные значения констант
Работа тока $A = Uq = Ult$	$A$ — работа, совершенная электростатическими силами внутри проводника при перемещении заряда с одного конца участка цепи на другой, Дж $U$ — напряжение на концах участка цепи, В $q$ — заряд, прошедший через проводник, Кл $I$ — сила тока в проводнике, А $t$ — время прохождения заряда, с
Закон Джоуля–Ленца $Q = I^2 R t$	$Q$ — количество теплоты, выделяющейся на участке цепи, Дж $R$ — сопротивление участка, Ом
Количество теплоты, выделяющееся в источнике тока $Q_{\text{ист}} = I^2 r t$	$Q_{\text{ист}}$ — количество теплоты, выделяющееся внутри источника тока, Дж $r$ — внутреннее сопротивление источника тока, Ом
Мощность электронагревателя $P = I^2 R$ $P = IU$	$P$ — количество теплоты, выделяющееся в единицу времени на электронагревателе, Вт

или края цоколя. Обычно приводятся данные о напряжении на концах лампы, которое обеспечивает ее оптимальный (номинальный) режим работы. Кроме того, указывается тепловая мощность, выделяемая на лампе, либо сила тока, на которую рассчитана лампа при работе в номинальном режиме.

4. На основе этих данных рассчитайте сопротивление нити лампы, исходя из того, что:

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R}, I = \frac{U}{R}$$

5. Измерьте линейкой примерную длину спирали  $L$ , диаметр спирали  $D$ , посчитайте число витков на ней  $N$ . Отметьте эти данные на увеличенном рисунке спирали. Они позволяют оценить длину нити ( $l = \pi DN$ ). Считая, что расстояние между витками примерно равно толщине нити, можно оценить и диаметр нити ( $d = \frac{L}{2N}$ ), а следовательно и площадь ее поперечного сечения ( $S = \frac{\pi d^2}{4}$ ).

6. Рассчитайте примерное значение сопротивления ( $R = \frac{\rho l}{S}$ ) нити, если она выполнена из вольфрама. Значение удельного сопротивления вольфрама  $\rho = 5,5 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

7. Сравните расчетное значение  $R$  на основе указанной мощности лампы и на основе ваших измерений параметров нити. Если расхождение более чем в 10 раз, сделайте правильные выводы о проделанной работе. Ниже приведены возможные варианты причин расхождений.

- А. На цоколе приведены неправильные номинальные значения мощности и напряжения.
- Б. Закон Джоуля–Ленца неверен для нити лампы.
- В. Из-за неточных измерений длины нити и числа витков, я могу ошибаться в 100 раз; тогда надо провести эти измерения повторно, рассматривая линейку, прижатую к лампе, и нить через лупу.
- Г. Спираль нити сделана не из вольфрама, а из \_\_\_\_\_.
- Д. Структура спирали сложнее, чем я нарисовал, и это можно увидеть, внимательно рассмотрев спираль с помощью лупы.

## 2. Изучение тепловыделения на нагревателе

Цель: Проверка закона Джоуля–Ленца.

Оборудование: спираль нагревательная, калориметр, термометр, мензурка с водой, ампер-

метр, вольтметр, источник тока на 4В, ключ, час с секундомером, соединительные провода.

Ход работы

1. Соберите цепь согласно рис. 135.

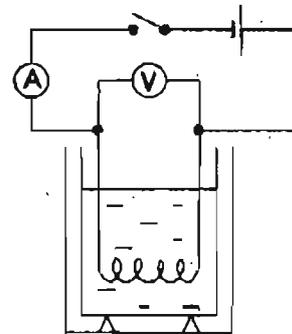


Рис. 135

Замкнув ключ на короткое время, убедитесь что амперметр и вольтметр показывают силу тока и напряжение на нагревателе. Спираль лучше взять из школьного оборудования. Она закреплена на крышке и закрыта пластмассовой решеткой, предохраняющей ее от контакта с алюминиевым стаканом калориметра.

2. Налейте в калориметр около 100 г воды и убедитесь, что нагревательная спираль покрывается водой при ее установке в калориметр. Измерьте начальную температуру воды  $t_1$ .
3. Установите спираль в калориметр, включите ток и засекайте время. В ходе нагревания воды (около 5 мин) снимите показания вольтметра  $U$  и амперметра  $I$ . После окончания нагревания отключите ток, перемешайте воду спиралью и измерьте температуру  $t_2$  воды в калориметре. Запишите все данные в таблицу.

№ опыта	1	2	3
$m$ , г			
$I$ , А			
$U$ , В			
$t$ , с			
$t_1$ , °С			
$t_2$ , °С			
$Q_1$ , Дж			
$Q_2$ , Дж			

- Повторите опыт, изменив время нагревания, каждый раз заменяя воду и давая остыть нагревателю до комнатной температуры. Время нагревания следует подобрать так, чтобы температура воды повышалась на 5–10 градусов.
- Рассчитайте количество теплоты  $Q_1 = IUt$ , выделившееся на нагревателе, по закону Джоуля–Ленца, и  $Q_2 = cm(t_2^\circ - t_1^\circ)$ , затраченной на нагревание воды.
- Оцените ошибки измерений и сделайте вывод о выполнении закона Джоуля–Ленца в вашем эксперименте. В случае большой ошибки объясните возможную причину отклонений.

*Самостоятельная  
работа*

### Обучающий тест

#### Уровни А и Б

- Две спирали, имеющие сопротивления  $R_1 = 20$  Ом и  $R_2 = 60$  Ом, включены последовательно в цепь постоянного тока. Сравните количество теплоты, выделившееся на этих спиралях за одинаковое время.

А.  $Q_1 = Q_2$ .       Б.  $Q_1 = 3Q_2$ .

В.  $Q_1 = \frac{1}{3} Q_2$ .       Г.  $Q_1 = 9Q_2$ .

- Два резистора, имеющие сопротивления  $R_1 = 2$  Ом и  $R_2 = 4$  Ом, включены параллельно в цепь постоянного тока. Сравните мощности электрического тока на этих резисторах.

А.  $P_1 = P_2$ .       Б.  $P_1 = 2P_2$ .

В.  $P_1 = 4P_2$ .       Г.  $P_2 = 2P_1$ .

- Чему равно сопротивление лампы накаливания, на которой написано:  $U = 250$  В,  $P = 25$  Вт, в номинальном режиме?

А. 0,1 Ом.       Б. 10 Ом.

В. 2500 Ом.       Г. 6250 Ом.

- Лампочка карманного фонарика имеет на цоколе надпись: 2,5 В и 0,25 А. Какова мощность лампочки в номинальном режиме?

А. 0,625 Вт.       Б. 10 Вт.

В. 0,1 Вт.       Г. 25 Вт.

- Три металлических провода одинакового сечения и одинаковой длины включены последовательно в цепь. Удельные электрические сопротивления материалов находятся в соотношении  $r_1 > r_2 > r_3$ . Как соотносится количество теплоты, выделившееся на проводах за определенное время при протекании через них тока?

А.  $Q_1 = Q_2 = Q_3$ .

Б.  $Q_1 > Q_2 > Q_3$ .

В.  $Q_1 < Q_2 < Q_3$ .

Г. Ответ неоднозначен.

- Три одинаковых резистора включают в цепь тремя способами, как показано на рис. 136.

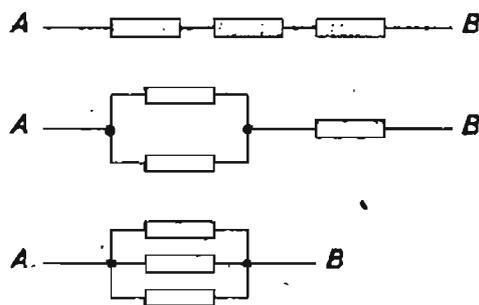


Рис. 136

Сравните количество теплоты, выделившееся на этом участке цепи в трех случаях, если напряжение на концах участка одинаково.

А.  $Q_1 = Q_2 = Q_3$ .

Б.  $Q_1 > Q_2 > Q_3$ .

В.  $Q_1 < Q_2 < Q_3$ .

Г.  $Q_1 > Q_2 = Q_3$ .

*Практикум по  
решению задач*

#### Уровень А

#### Примеры решения задач

- Какое количество теплоты выделится за 5 с на каждом из резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , изображенных на схеме (рис. 137), если амперметр показывает силу тока 1 А?

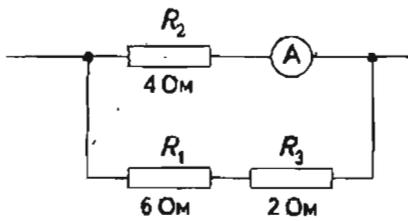


Рис. 137

Решение. Амперметр показывает силу тока  $I_2 = 1$  А через резистор  $R_2 = 4$  Ом. Поскольку напряжение на этом резисторе и на участке, содержащем  $R_1 + R_3$  ( $R_{13} = 6 \text{ Ом} + 2 \text{ Ом} = 8 \text{ Ом}$ ) одинаково, то ток

$$I_1 = \frac{U}{R_{13}} = \frac{I_2 R_2}{R_{13}} = \frac{1 \cdot 4}{8} = 0,5 \text{ (А)}.$$

Тогда по закону Джоуля–Ленца:

$$Q_2 = I_2^2 R_2 t = 20 \text{ Дж};$$

$$Q_1 = I_1^2 R_1 t = 7,5 \text{ Дж};$$

$$Q_3 = I_1^2 R_3 t = 2,5 \text{ Дж}.$$

Ответ: 7,5 Дж; 20 Дж; 2,5 Дж.

2. Чему равно сопротивление лампы накаливания мощностью  $P = 60$  Вт, если напряжение на ней  $U = 120$  В?

Решение.

$$P = I^2 R = \left(\frac{U}{R}\right)^2 R = \frac{U^2}{R} \Rightarrow R = \frac{U^2}{P} = 240 \text{ (Ом)}$$

Ответ: 240 Ом.

3. В чайнике мощностью 2 кВт нагрели 1,5 кг воды за 5 минут от температуры  $20^\circ\text{C}$  до кипения. Каков КПД нагревателя?

Дано:  $P = 2$  кВт;  
 $m = 1,5$  кг;  
 $t = 5$  мин = 300 с;  
 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ;  
 $t_2 = 100^\circ\text{C}$ ;  
 $c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ .  
 КПД — ?

Решение. Количество теплоты, пошедшее на нагревание воды в чайнике:

$$Q_1 = cm(t_2 - t_1).$$

Количество тепла, выделившееся в нагревателе:

$$Q_2 = Pt.$$

По определению КПД

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{c(m t_2 - t_1)}{Pt} = 0,84$$

Ответ: 84%.

1. Какое количество теплоты выделится за 5 с на каждом из резисторов  $R_1, R_2, R_3$ , изображенных на схемах (рис. 138), если амперметр показывает силу тока 1 А?

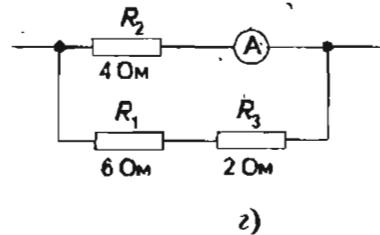
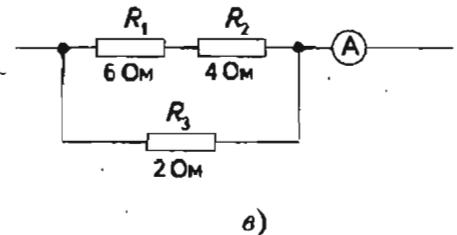
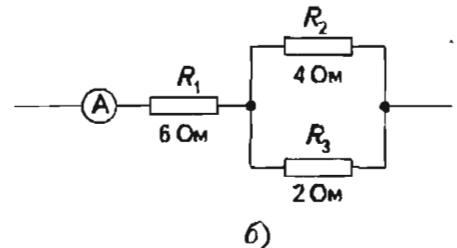
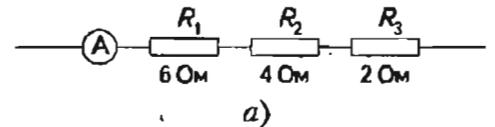


Рис. 138

2. Какова мощность лампы, если ее сопротивление 100 Ом, а сила тока в цепи 5 А?

3. Чему равно сопротивление лампы, если при силе тока 4 А на ней выделяется 250 Дж теплоты за 1 с?

[3]

4. Чему равно сопротивление лампы накаливания, если напряжение на ней  $U = 220\text{ В}$  и каждую секунду выделяется энергия  $400\text{ Дж}$ ?

5. Имеются две лампы, рассчитанные на напряжение  $220\text{ В}$  каждая. Мощности этих ламп равны  $P_1 = 200\text{ Вт}$  и  $P_2 = 100\text{ Вт}$ . Сравните электрические сопротивления этих ламп при работе в номинальном режиме.

6. Резистор с сопротивлением  $8\text{ Ом}$  подключен к батарее с ЭДС  $4,5\text{ В}$  и внутренним сопротивлением  $1\text{ Ом}$ . Какое количество теплоты выделяется при этом за  $1\text{ с}$  на резисторе и внутри источника тока?

7. В схеме, изображенной на рис. 139, амперметр показывает  $1,5\text{ А}$ .

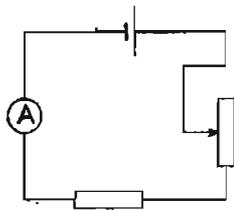
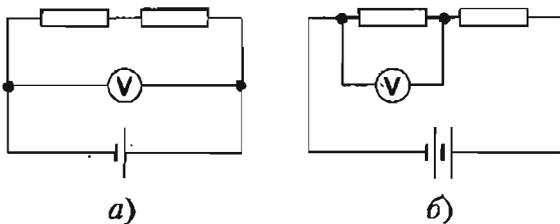


Рис. 139

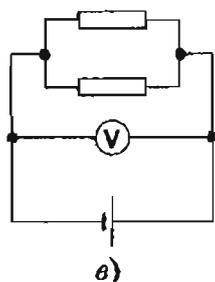
При этом на резисторе выделяется  $3000\text{ Дж}$  теплоты за  $5\text{ минут}$ . Каково сопротивление резистора?

8. Два резистора с сопротивлением по  $100\text{ Ом}$  каждый, соединяют с источником тока три раза (рис. 140). При этом каждый раз вольтметр показывает напряжение  $200\text{ В}$ . Какое количество теплоты выделяется на обоих резисторах вместе в каждом из рассмотренных случаев за  $1\text{ минуту}$ ?



а)

б)



в)

Рис. 140

9. За какое время электрочайник мощностью  $1\text{ кВт}$  нагреет  $1\text{ кг}$  воды от  $20^\circ\text{С}$  до  $100^\circ\text{С}$ , если теплоемкость воды  $4200\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{град}}$ ? КПД нагревателя равен  $70\%$ .

10. Сколько электроэнергии потребляет чайник мощностью  $2\text{ кВт}$  за  $5\text{ минут}$ ?

**Уровень Б**

**Пример решения задачи**

Реостат с максимальным сопротивлением  $8\text{ Ом}$  подключен непосредственно к клеммам батареи с ЭДС  $4,5\text{ В}$  и внутренним сопротивлением  $1\text{ Ом}$  (рис. 141).

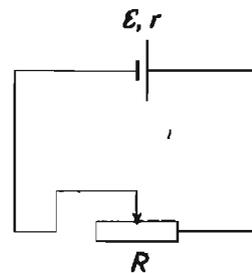


Рис. 141

Постройте график зависимости мощности, выделяемой на реостате, от сопротивления  $R$  реостата. При каком  $R$  количество теплоты, выделяемое на реостате в единицу времени, максимально?

**Решение.** Ток через реостат по закону Ома для полной цепи равен:  $I = \frac{\epsilon}{(R+r)}$ . При этом мощность тока, выделяемая на реостате, равна  $P = I^2 R = \frac{\epsilon^2 R}{(R+r)^2}$ .

Рассчитаем мощность  $P$  при разных значениях сопротивления  $R$  и заполним таблицу.

<b>R, Ом</b>	1	2	3	4	5	8	0,8	0,6	0,4	0,2
<b>P, Вт</b>	5,1	4,5	3,8	3,2	2,5	2	5	4,7	4,1	2,8

Построим график (рис. 142).

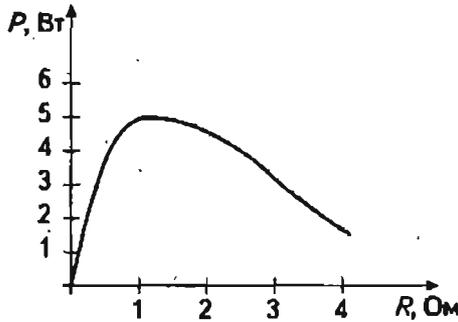


Рис. 142

Видно, что при  $R=r=1$  Ом, график проходит через максимум. Можно исследовать функцию  $P=P(R)$  на максимум с помощью дифференцирования и строго доказать, что ее максимум достигается при  $R=r$ . При этом:

$$P_{\max} = \frac{\mathcal{E}^2}{4r}$$

Ответ: при  $R=r$ .

11. Две лампы, рассчитанные на 220 В и имеющие номинальные мощности  $P_1 = 100$  Вт,  $P_2 = 25$  Вт, включены в сеть с напряжением  $U = 220$  В последовательно. Какая мощность будет выделяться на этих лампах при таком подключении?
12. Резисторы, используемые в радиотехнике, имеют не только определенное номинальное значение сопротивления  $R$ , но и предельное значение рассеиваемой на нем мощности  $P$ , которое определяется габаритами резистора и материалом, из которого изготовлен его корпус. Рассчитайте предельное значение силы тока через резистор, если на нем написано: 2 кОм и 2 Вт.
13. Два одинаковых резистора с сопротивлением 4 Ом каждый присоединяют к источнику тока последовательно и параллельно друг другу. При этом количество теплоты, выделяемое на двух резисторах в 1 с, одинаково при обоих способах соединения. При каком внутреннем сопротивлении источника такое возможно?
14. Из двух кусков одинакового металла одинаковой массы  $m_1 = m_2$  изготовили два провода, от-

личающиеся по длине в 2 раза,  $l_2 = 2l_1$ . Как отличается количество тепла, выделяющиеся на этих проводах, если:

- а) их соединили последовательно и поддерживают на конце цепи напряжение  $U$ ;
- б) их соединили параллельно и поддерживают на концах напряжение  $U$ .

Как отличается суммарное количество теплоты, выделяющееся на обоих проводах в этих двух случаях?

15. При коротком замыкании клемм батареи через нее проходит ток в 3 А. Какое количество теплоты выделяется при этом в источнике тока за 1 мин, если его ЭДС 4 В?
16. Батарея с ЭДС 6 В и внутренним сопротивлением 0,4 Ом подсоединена к резистору, на котором за 2 с выделилось количество теплоты, равное 40 Дж. Каковы сопротивление резистора, сила тока в цепи и напряжение на концах резистора?
17. Три лампы с маркировкой Л1 (3 В, 1 Вт), Л2 (3 В, 0,25 А) и Л3 (3 В, 12 Ом) соединены по схеме (рис. 143). Какое количество тепла выделяется на лампе Л3 за 1 минуту?

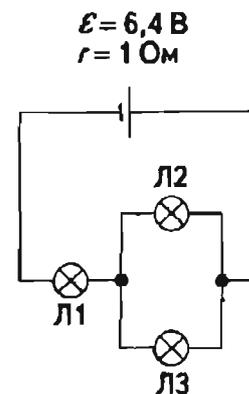


Рис. 143

*Контрольная  
работа*

### Уровень А (рассчитана на 45 мин)

1. Сопротивление нагревательного элемента утюга 110 Ом. Какова мощность нагревателя утюга, если напряжение питающей сети 220 В?

2. При силе тока  $0,1\text{ А}$  на лампе каждую секунду выделяется количество теплоты равное  $0,2\text{ Дж}$  (рис. 144).

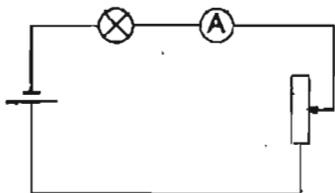


Рис. 144

Какое количество теплоты будет выделяться на лампе за  $1\text{ с}$ , если амперметр покажет  $0,2\text{ А}$ ? Какое количество теплоты выделится при этом на лампе за  $10\text{ минут}$ ? Изменением сопротивления спирали лампочки в зависимости от температуры пренебречь.

3. К батарейке с ЭДС  $1,5\text{ В}$  и внутренним сопротивлением  $1\text{ Ом}$ , подключен резистор с сопротивлением  $2\text{ Ом}$ . Сколько тепла выделится в источнике тока за  $10\text{ с}$ ?
4. Кипятильник мощностью  $200\text{ Вт}$ , нагревает стакан воды ( $150\text{ г}$ ) за  $5\text{ минут}$  на  $80^\circ\text{С}$ . Какое количество теплоты при этом уходит в воздух?

### Уровень Б (рассчитана на 45 мин)

1. Три лампы, на которых написано:  $110\text{ В}$ , а также  $100\text{ Вт}$  ( $L1$  и  $L2$ ) и  $200\text{ Вт}$  ( $L3$ ) соединены, как показано на рис. 145 и подключены к сети с напряжением  $220\text{ В}$ . Какие из лампочек работают при этом в номинальном режиме?

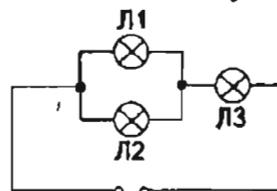


Рис. 145

2. В плитке, рассчитанной на работу при напряжении на ее входных клеммах  $220\text{ В}$ , имеются две спирали по  $100\text{ Ом}$  каждая. Переключатель обеспечивает подключение к входным клеммам либо одной спирали, либо двух последовательно, либо двух параллельно. Какова мощность плитки при этих трех положениях переключателя?
3. Два источника тока с внутренним сопротивлением  $0,5\text{ Ом}$  и  $2\text{ Ом}$  и с ЭДС  $3\text{ В}$  и  $6\text{ В}$ , соответственно, подключены к одинаковым лампам. Яркость ламп при этом одинакова. Каковы мощности ламп в этом режиме?



### Изучив эту тему,

- ♦ вы узнаете о физической величине, количественно характеризующей магнитное поле;
- ♦ поймете, как истолковать информацию о магнитном поле, представленную в виде картины магнитных силовых линий;
- ♦ научитесь связывать количественные характеристики магнитных свойств материалов и области их практического применения

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

### Постоянные магниты

С древности магнитами называли стержни из специальной руды — магнитного железняка, обладающие следующими свойствами, знакомыми всем с детства:

- притягивать железосодержащие предметы;
- ориентироваться в пространстве одним из концов («северным полюсом») на географический север;
- отталкиваться друг от друга одноименными полюсами («северный» — «северный», «южный» — «южный»);
- намагничивать другие железосодержащие тела при трении или контакте.

### Основные понятия:

Постоянный магнит • Электромагнит • Магнитное поле • Вектор индукции магнитного поля • Линии магнитной индукции • Магнитная проницаемость • Парамагнетики • Диамагнетики • Ферромагнетики

В настоящее время такими свойствами естественных магнитов обладают искусственные магниты.

При этом попытки обнаружить монополюсный магнит, например разрезая стержневой магнит пополам, оказались безуспешными. У магнита всегда два полюса.

### Магнитное поле

Изменение свойств пространства при внесении в него постоянных магнитов можно трактовать как наличие в нем магнитного поля, аналогичного электрическому, существующему вокруг неподвижных зарядов. Так же как и электрическое поле, магнит-

ное поле неощутимо органами чувств человека, но его наличие можно зарегистрировать с помощью простейшего устройства — легкой *магнитной стрелки*, насаженной на ось, т. е. компаса.

### Магнитное поле тока

В начале XIX в. было установлено (Х. Эрстед), что электрический ток, протекающий по проводнику, оказывает ориентирующее действие на магнитную стрелку. Из третьего закона Ньютона следует, что, с какой силой проводник с током действует на магнитную стрелку, с такой силой и стрелка действует на проводник с током. Поэтому если взять тяжелый магнит и легкий провод (а лучше катушку с большим количеством витков), то провод с током начинает двигаться относительно магнита. Мы уже упоминали об этом при рассмотрении магнитного действия тока. В настоящее время окончательно утвердились представления о том, что свойства постоянных магнитов объясняются совокупным действием молекулярных токов в веществе.

### Вектор магнитной индукции магнитного поля

Магнитное поле, созданное постоянным магнитом или током, характеризуется физической величиной, называемой *вектором магнитной индукции*. Направление вектора задается направлением магнитной стрелки, помещенной в данную точку поля. Оно совпадает с направлением, на которое указывает северный полюс стрелки (рис. 146).

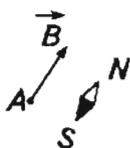
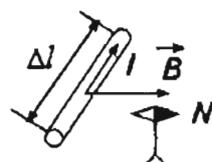


Рис. 146

Модуль вектора магнитной индукции определяется с помощью силы, действующей на проводник с током. Для определения модуля  $\vec{B}$  надо проводник с током поместить в данную точку пространства перпендикулярно направлению вектора  $\vec{B}$  (при другой ориентации сила будет меньше), пропустить через него ток в 1 А и, если в расчете на длину проводника (1 м), сила окажется равной 1 Н, то говорят, что в данной точке пространства модуль вектора магнитной индукции равен 1 тесла (1 Тл) (рис. 147).



$$|\vec{B}| = B = \frac{F}{\Delta l \cdot I}$$

Рис. 147

Принцип суперпозиции позволяет складывать векторы магнитной индукции  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$  магнитных полей, созданных разными источниками, по правилам сложения векторов (рис. 148).

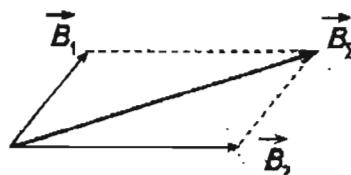


Рис. 148

### Линии магнитной индукции

Для наглядности картины изменения вектора магнитной индукции при переходе от одной точки магнитного поля к другой вводится понятие силовых линий магнитной индукции. Это такие воображаемые линии, в каждой точке которых вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  направлен по касательной. «Густота» линий отражает модуль вектора магнитной индукции.

На рис. 149 показаны приемы исследования магнитного поля вокруг стержневого магнита с помощью магнитных стрелок (а — определение направления  $\vec{B}$ ), провода с током (б — определение модуля  $\vec{B}$ ) и картина расположения линий магнитной индукции вокруг такого магнита (в — вектор  $\vec{B}$  по направлению и по модулю соответствует направлению и «густоте» магнитных силовых линий).

Магнитные стрелки при установлении картины магнитного поля можно заменить железными опилками, которые намагничиваются в поле магнита и при легком потряхивании картона, ориентируются по линиям магнитной индукции (рис. 150).

Однородное магнитное поле — поле, в каждой точке которого магнитная индукция постоянна. На рис. 151 приведены способы изображения линий магнитной индукции однородного магнитного поля, направленного вправо (а), влево (б), за плоскость листа (в) и из него (г).

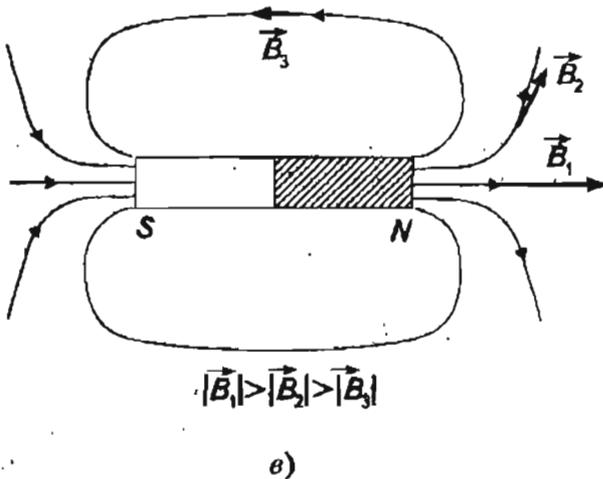
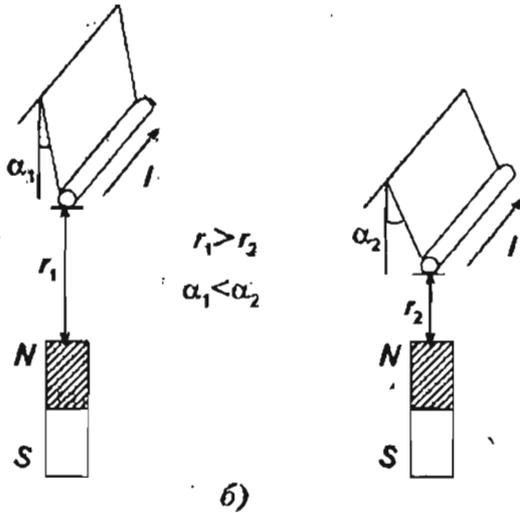
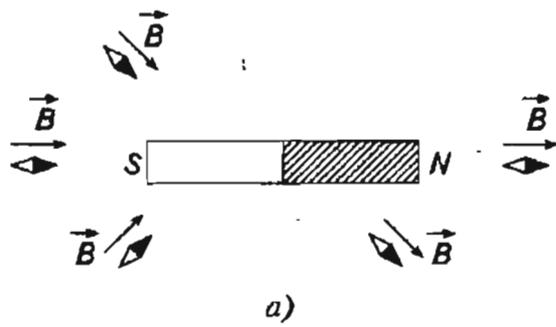


Рис. 149.

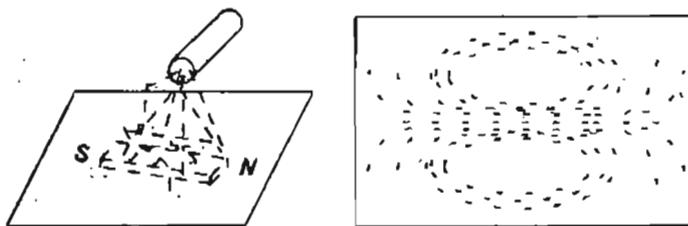


Рис. 150.

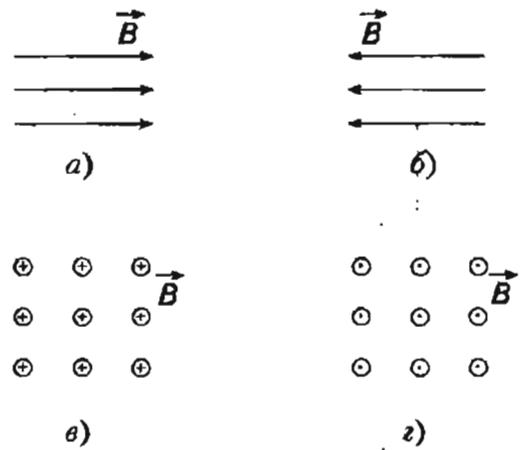


Рис. 151

**Картина магнитных полей, созданных постоянными магнитами и проводниками с током**

На рис. 152 приведены картины магнитных полей различных объектов: *a* — полосового или стержневого магнита; *b* — подковообразного магнита; *c* — прямого провода с током; *г* — проволочного кольца; *д* — катушки с током:

На каждой из этих картин следует обратить внимание на следующие особенности:

- линии магнитной индукции всегда замкнуты, хотя на рисунках часть линий, находящихся внутри магнита, не показывают;
- линии магнитной индукции во внешнем пространстве постоянных магнитов идут от северного полюса к южному, а внутри них от южного к северному;
- направление линий магнитной индукции вокруг прямого провода определяется по правилу «буравчика» (он же правовращающий винт, он же штопор, он же лампочка накаливания, вворачиваемая в патрон настольной лампы);
- направление вектора  $\vec{B}$  в центре кольца с током можно получить, рассматривая его как сумму полей, созданных маленькими дугами кольца, которые являются элементами прямого тока. Такое суммирование в итоге приводит к выводу, что в центре кольца вектор  $\vec{B}$  направлен так, как движется буравчик (штопор, лампа) при вращении его ручки по направлению тока в кольце;
- магнитное поле катушки с током снаружи практически равно нулю, а внутри и на концах полностью совпадает с магнитным полем постоянного стержневого магнита. Поэтому катушку с

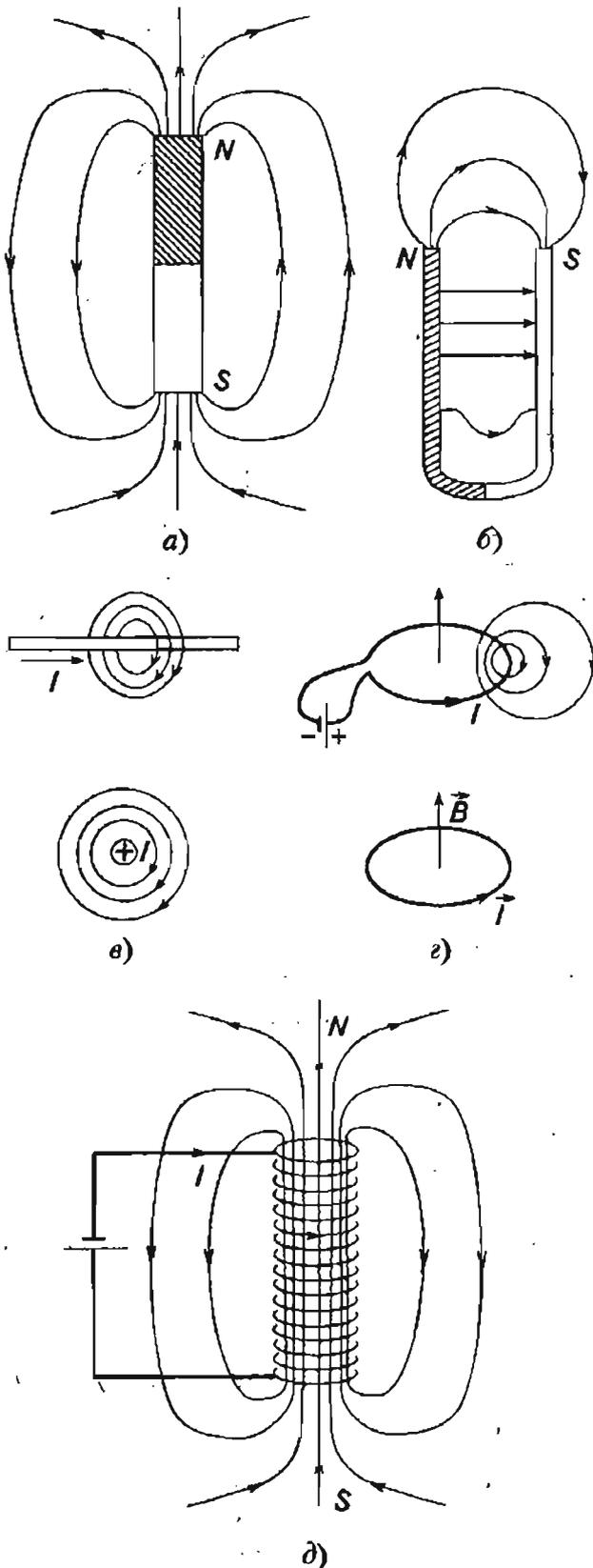


Рис. 151

током называют электромагнитом, приписывая концу, из которого выходят линии магнитной индукции, название «северный полюс», а противоположному концу — «южный». Легкая катушка может с успехом заменить магнитную стрелку и в опытах по определению направления вектора  $\vec{B}$  в пространстве.

**Модуль вектора магнитной индукции вблизи прямого провода, кругового витка и внутри цилиндрической катушки (соленоида)**

Как было установлено экспериментально, модуль вектора магнитной индукции в точке вблизи проводника с током прямо пропорционален силе тока и обратно пропорционален расстоянию от точки до проводника. Это соответствует естественным представлениям, что «сила» магнитного поля должна ослабевать при удалении от магнита и при уменьшении тока, его порождающего. Коэффициент пропорциональности в СИ принято обозначать  $\frac{\mu_0}{2\pi}$ :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r},$$

где:  $\mu_0$  — магнитная постоянная  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \frac{H}{A^2}$ .

Для кругового витка с током диаметра  $D$ :  $B = \frac{\mu_0 I}{D}$ .

Внутри цилиндрической катушки (соленоида) с числом витков  $N$  и длиной  $L$  магнитное поле однородно, и модуль вектора магнитной индукции равен:  $B = \frac{\mu_0 IN}{L}$ .

**Магнитные свойства веществ**

Как показывает опыт, притягивающая способность электромагнита (цилиндрической катушки) сильно возрастает, если поместить в катушку сердечник из железа, никеля или железосодержащих сплавов (*ферромагнетики*). Другими словами, модуль вектора магнитной индукции поля электромагнита сильно (в 2 — 1000 раз) увеличивается. Другие материалы меняют это поле незначительно (*парамагнетики*) или даже уменьшают его (*диамагнетики*).

Это можно объяснить тем, что к магнитному полю самой катушки добавляется поле, возникающее за счет взаимодействия материала сердечника и магнитного поля катушки. Стержень внутри катушки

становится магнитом, полюс которого совпадает с полюсом катушки или противоположен ему. Густота линий магнитной индукции у поверхности стержня и внутри него совпадают, поэтому можно сравнивать модули вектора магнитной индукции поля в материале стержня  $\vec{B}$  и внешнего поля  $\vec{B}_0$ , которое было в катушке (в вакууме) и привело к изменению свойств вещества. В качестве «сердечника» может выступать и цилиндр, заполненный газом или жидкостью.

Магнитная проницаемость  $\mu$  (не путать с  $\mu_0$ ) показывает, во сколько раз модуль вектора магнитной индукции  $B$  в веществе отличается от модуля вектора магнитной индукции в вакууме  $B_0$ :

$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

Из этого становится понятно, как можно измерять эту величину.

Для ферромагнетиков  $\mu \gg 1$  (кобальт, никель, их некоторые сплавы и окислы), для парамагнетиков  $\mu \geq 1$  (алюминий, олово, платина, кислород, перманганат калия и т. д.), для диамагнетиков  $\mu < 1$  (медь, свинец, золото, вода, ацетон, водород и т. д.)

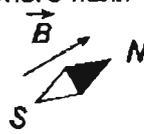
### Жесткие и мягкие ферромагнетики

Они получили свое название благодаря тому, что у одних материалов намагничивание и размагничивание при изменении внешнего магнитного поля происходит быстро, другие же остаются в намагниченном состоянии долго, и могут быть размагничены только при приложении сильного противоположно направленного магнитного поля.

Жесткие ферромагнетики используются для изготовления постоянных магнитов и запоминающих устройств (магнитофонные ленты, жесткие диски компьютеров и т.п.)

### Зависимость магнитных свойств вещества от температуры

Намагниченность веществ объясняется упорядоченностью магнитных полей, создаваемых электронами, входящими в состав любого атома. Естественно, такая упорядоченность нарушается из-за хаотического теплового движения атомов и молекул. Поэтому намагниченность всех тел с температурой убывает. Особенно сильный скачок происходит у ферромагнетиков, которые при некоторой температуре (точка Кюри) переходят из ферромагнетиков в парамагнетики.

Законы в виде формул	Обозначения величин, единицы измерения в СИ, справочные значения констант
<p>Вектор магнитной индукции</p> $ \vec{B}  = B = \frac{F_{\text{макс}}}{Il}$ <p>Направление <math>B</math> — направление северного полюса свободной магнитной стрелки в данной точке магнитного поля</p> 	<p><math>F_{\text{макс}}</math> — максимальная сила, действующая на пробный проводник с током, помещенный в данную точку поля, Н</p> <p><math>I</math> — сила тока в пробном проводнике, А</p> <p><math>l</math> — длина пробного проводника, м</p> <p>Единицы В: 1 Тесла = 1 Тл</p>
<p>Магнитное поле прямого провода</p> $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$	<p><math>\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}</math></p> <p><math>I</math> — сила тока в проводе</p> <p><math>r</math> — расстояние от точки магнитного поля до провода</p>
<p>Магнитное поле в центре кольцевого витка</p> $B = \frac{\mu_0 I}{D}$	<p><math>D</math> — диаметр кольца, м</p> <p><math>I</math> — сила тока в витке, А</p>
<p>Магнитная индукция поля внутри цилиндрической катушки (соленоида)</p> $B = \frac{\mu_0 IN}{L}$	<p><math>N</math> — число витков на катушке, безразмерно</p> <p><math>L</math> — длина катушки, м</p> <p><math>I</math> — сила тока в проводе катушки, А</p>
<p>Магнитная проницаемость вещества</p> $\mu = \frac{B}{B_0}$	<p><math>B</math> — модуль вектора магнитной индукции в веществе, Тл</p> <p><math>B_0</math> — модуль вектора магнитной индукции в той же точке пространства в отсутствие вещества (в вакууме), Тл</p>

Магнитные свойства веществ			
	Вещество	Магнитная проницаемость $\mu$ при больших $B_0$	Температура Кюри, °С
Ферромагнетики, $\mu \gg 1$			
1	Железо	7000 – 680000 (в зависимости от чистоты)	768
2	Кобальт	175	1131
3	Никель	1120	358
4	Чугун	600 – 800	–
5	Сталь трансформаторная	8000	–
6	Сплав железа (32%) с никелем (68%) Пермаллой-68	250000	$\approx 70$
Парамагнетики, $\mu \geq 1$			
7	Алюминий	1,000023	–
8	Кислород жидкий	1,00346	–
9	Кислород	1,0000019	–
10	Эбонит	1,000014	–
Диамагнетики, $\mu \leq 1$			
11	Висмут	0,999824	–
12	Вода	0,999991	–
13	Водород	0,999999937	–

*Лабораторные  
работы*

### 1. Изучение свойств постоянных магнитов

Цель: получение картины силовых линий магнитного поля вокруг постоянного магнита.

Оборудование: магнит полосовой (2 шт.), магнит подковообразный, магнитная стрелка на подставке (или компас), скрепки стальные, медный провод, карандаш (2 шт.), ластик, опилки железные (можно наточить из гвоздя напильником), кусок картона или белой бумаги размером в 2–3 длины полосовых магнитов.

### Ход работы

1. Удалите все магниты на один угол стола и убедитесь, что магнитная стрелка на игле или стрелка компаса все время ориентируется одинаково при выведении из равновесия. Вспомнив, где в вашей местности север, а где юг, проследите, каким концом стрелка смотрит на север (иногда магнитные стрелки, используемые на практических занятиях в школах, оказываются перемagnиченными, и синий конец показывает на юг). Проверьте, притягивается ли к стрелке карандаш, канцелярские скрепки, ластик, пластмассовый корпус ручки, медный провод.

- Найдя северный полюс стрелки, установите полюса полосовых магнитов и подковообразного. И опять не советуем доверять окраске магнитов (они тоже бывают перемагничены), а самостоятельно установить, какой конец магнита отталкивает северный полюс стрелки. Обозначьте мелом северный и южный полюса магнитов.
- Расположите полосовой магнит на одной высоте со стрелкой, подложив под него стопку книг. Если вы работаете с компасом, этого можно не делать. Зарисуйте положение стрелки в нескольких точках пространства вокруг магнита, перемещая ее и дожидаясь, когда она успокоится. Нарисуйте направление вектора  $\vec{B}$  в каждой из этих точек.
- По скорости разворота стрелки при выведении ее из положения равновесия в разных точках попробуйте определить относительную «силу магнитного поля» в этих точках. К каким точкам магнита сильнее всего притягивается стрелка? Внесите в соответствии с этими результатами коррективы в длину стрелок, обозначающих вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  на вашем рисунке.
- Проведите на рисунке линии магнитной индукции, стараясь, чтобы линия, проходящая через исследованные вами точки пространства, проходила, касаясь вектора  $\vec{B}$ . Посмотрите, соответствуют ли на вашей картине линий магнитной индукции их густота и длина вектора магнитной индукции.
- Положите лист картона на полосовой магнит и равномерно посыпьте его железными опилками. Не сдвигая магнит и картонку относительно друг друга, осторожно постучите по картонке, чтобы опилки могли подпрыгивать и перемещаться. Следите, как выстраиваются опилки на листе. После установления четкой картины с вырисовавшимися линиями перерисуйте ее в тетрадь. Проанализируйте, как она согласуется с картиной, полученной вами с помощью магнитной стрелки. Напишите объяснение того, почему опилки выстраиваются, образуя скопления вдоль силовой линии.
- Получите картину магнитного поля двух полосовых магнитов, расположенных параллельно друг другу, и подковообразного магнита.

## 2. Измерение модуля вектора магнитной индукции между полюсами подковообразного магнита

**Цель:** закрепить определение вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  и провести измерение его модуля в реальном магнитном поле.

**Оборудование:** провод медный (диаметром 1–2 мм и диаметром 0,1–0,2 мм), весы с набором разновесов, амперметр, реостат, источник тока, магнит подковообразный, держатель с лапкой, соединительные провода.

**Ход работы**

- Изготовьте П-образную рамку с длиной перемычки  $L$  меньшей, чем ширина полюсных наконечников магнита, как показано на рис. 153.

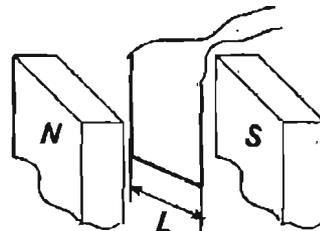


Рис. 153

- Зачистите концы рамки и тонкого медного провода и скрепите рамку с токоподводящим проводом (рис. 154).

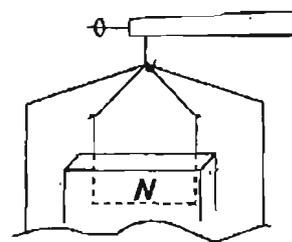


Рис. 154

- Закрепите над чашкой весов в лапке штатива подковообразный магнит, как показано на рис. 155.

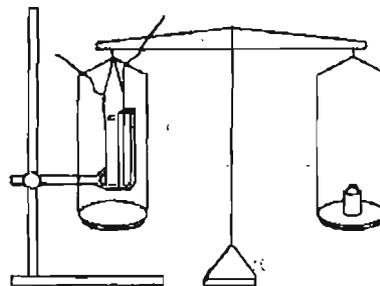


Рис. 155

- Нитями скрепите концы рамки и подвесьте ее к крючку, на котором висит левая чашка весов так, чтобы поперечная перекладина рамки была на 2 см погружена в зазор между полюсами магнита и располагалась перпендикулярно линиям магнитной индукции магнитного поля между полюсами.
- Уравновесьте рамку, помещая на правую чашку весов разновесы. Подводящие провода не должны препятствовать движению рамки под действием даже небольших сил. Проверьте это, трогая провода и наблюдая, не нарушается ли при этом равновесие весов. Если это происходит, закрепите их в лапках дополнительных штативов, чтобы они подходили к рамке горизонтально.
- Соберите электрическую часть цепи, как показано на рис. 156, чтобы можно было регулировать реостатом силу тока через рамку.

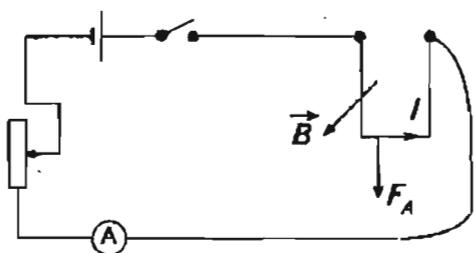


Рис. 156

- Замкните ключ и, регулируя силу тока, добейтесь, чтобы взаимодействие рамки с магнитным полем магнита нарушало равновесие весов.  
**ВНИМАНИЕ!** Сила тока не должна превышать 2 А, чтобы не сжечь источник тока. Если это не получается, см. п. 10.
- Зафиксируйте силу тока  $I$  в цепи. Уравновесьте чашку весов, добавив перегрузок массой  $M$ .
- Модуль вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  легко подсчитать, зная определение  $B$ :

$$B = \frac{Mg}{IL}$$

- Возможно, магнитное поле вашего магнита так мало, что вы не зафиксируете нарушение равновесия при силе тока в 1–2 А. Тогда придется изготовить рамку, содержащую несколько витков  $N$  (хотя бы 10 витков), как показано на рис. 157, и все проделать сначала.

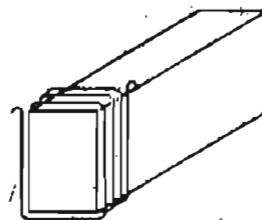


Рис. 157

В этом случае индукция магнитного поля будет равна:

$$B = \frac{Mg}{NIL}$$

- Напишите выводы из работы с учетом ошибок измерений.

*Самостоятельная работа*

**Обучающий тест**

- Постоянный магнит притягивает...
  - А. одноименный полюс второго магнита.
  - Б. любые металлические предметы.
  - В. некоторые железосодержащие сплавы.
  - Г. любые железосодержащие сплавы.
- Магнитом можно назвать...
  - А. железный брусок, который отталкивается от другого железного бруска.
  - Б. стержень, который определенным образом ориентируется в пространстве.
  - В. брусок, который придает стальной игле при трении о нее способность притягивать мелкие железосодержащие предметы и поворачиваться в определенном направлении, если иглу положить на плавающий в воде легкий диск.
  - Г. железный брусок, притягивающийся к земле.
- Векторной величиной является...
  - А. заряд.
  - Б. магнитная индукция.
  - В. напряжение.
  - Г. сила тока.

4. Линии магнитной индукции — это...

- А. линии, совпадающие с формой магнита.  
 Б. линии, по которым движется положительный заряд, попадая в магнитное поле.  
 В. маркировочные штрихи на стержневом магните, число которых указывает на силу магнита.  
 Г. воображаемые линии, в каждой точке которых вектор магнитной индукции направлен по касательной.

5. На рис. 158 приведена картина линий магнитной индукции в некоторой области пространства.

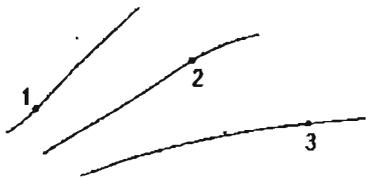


Рис. 158

Модуль вектора магнитной индукции максимален в точке...

- А. 1.                       Б. 2.  
 В. 3.                       Г. во всех одинаков.
6. Линии магнитной индукции в пространстве вне постоянного магнита...
- А. начинаются на северном полюсе магнита, заканчиваются на бесконечности.  
 Б. начинаются на северном полюсе магнита, заканчиваются на южном.  
 В. начинаются на южном полюсе магнита, заканчиваются на бесконечности.  
 Г. начинаются на южном полюсе магнита заканчиваются на северном.
7. На каком из рисунков (рис. 159) приведена наиболее правдоподобная картина линий магнитной индукции двух полосовых магнитов?

8. Модуль вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  магнитного поля, созданного прямым проводом с током, при увеличении расстояния от провода в 2 раза...

- А. возрастет в 2 раза.  
 Б. уменьшится в 2 раза.  
 В. не изменится.  
 Г. зависит от силы тока в проводнике.

9. Конфигурация линий магнитной индукции соленоида (прямая катушка с током) сходна с картиной силовых линий...

- А. полосового магнита.  
 Б. подковообразного магнита.  
 В. двух параллельных полосовых магнитов с противоположно направленными полюсами.  
 Г. прямого провода с током.

10. Электромагнит может намагнитить...

- А. любые металлы.  
 Б. только железосодержащие материалы.  
 В. любые железосодержащие материалы.  
 Г. некоторые железосодержащие материалы.

11. Железный гвоздь притягивался к катушке с током с силой  $F$ . После введения в катушку металлического стержня сила притяжения гвоздя стала  $F_1 < F$ .

Материал стержня...

- А. ферромагнетик.  
 Б. парамагнетик.  
 В. диамагнетик.  
 Г. либо ферромагнетик, либо парамагнетик.

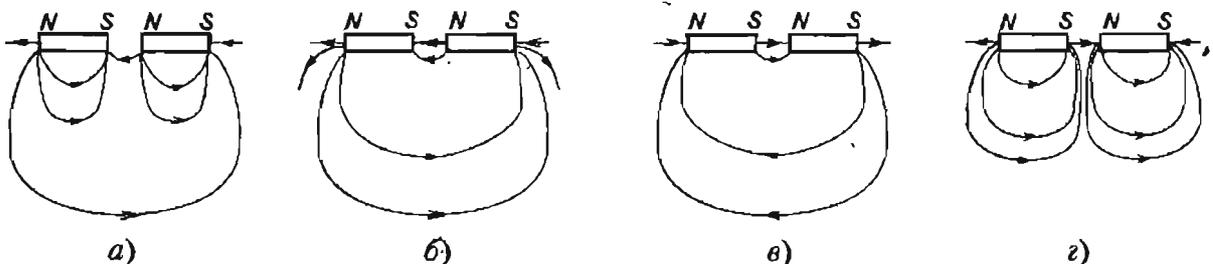


Рис. 159

12. При увеличении температуры образца выше температуры Кюри происходит переход из...

- А. ферромагнитного состояния в парамагнитное.
- Б. парамагнитного в ферромагнитное.
- В. диамагнитного в парамагнитное.
- Г. диамагнитного в ферромагнитное.

*Контрольная  
работа*

**Уровень А** (рассчитано на 45 мин)

1. В точках 1, 2, 3 (рис. 160) показано расположение магнитных стрелок. Нарисуйте, как в этих точках направлен вектор магнитной индукции.

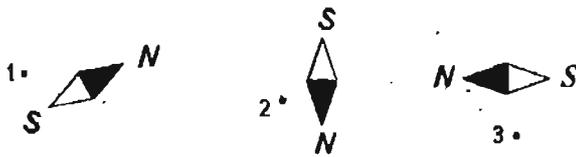


Рис. 160

2. На рис. 161 показано несколько линий магнитной индукции. В какой из трех точек на этих линиях правильно нарисован вектор магнитной индукции? Ответ обоснуйте.

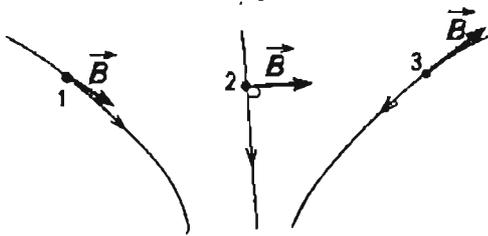


Рис. 161

3. Нарисуйте картину линий магнитной индукции при протекании тока через катушку, намотанную на картонный цилиндр (рис. 162).

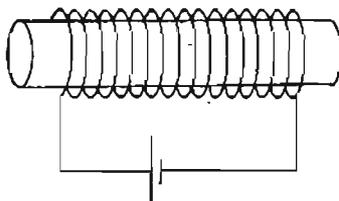


Рис. 162

Как будет меняться эта картина при:

- а) увеличении силы тока в катушке?
- б) числа витков, намотанных на катушку?
- в) введении в нее железного сердечника?

**Уровень Б** (рассчитано на 45 мин)

1. Полосовой магнит разрезали посередине и правую половину унесли в другую комнату. Нарисуйте картину линий магнитной индукции оставшейся части.
2. На рис. 163 приведен фрагмент картины распределения линий магнитной индукции поля, созданного некоторым источником.



Рис. 163

Выберите на каждой линии точку и проведите вектор магнитной индукции.

3. В некоторой точке магнитного поля удалось измерить силу, действующую на прямой проводник длиной 10 см при силе тока 2 А. Она оказалась равна 0,036 Н. Чему равен модуль вектора магнитной индукции в этой точке поля?
4. Вблизи неподвижной цилиндрической катушки подвешена на тонких проводках маленькая катушка с током (рис. 164). По углу ее отклонения от вертикали можно судить о силе, действующей на нее со стороны неподвижной катушки.

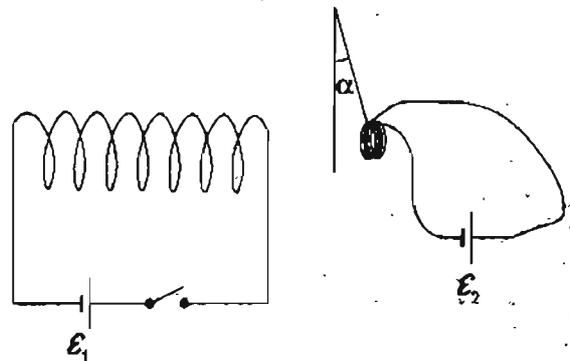


Рис. 164

В начальный момент в обеих катушках сила тока 2 А и маленькая катушка отклонена на угол  $\alpha$  влево.

Как изменится угол при:

а) изменении направления тока в большой катушке;

б) при вдвигании в катушку стержня:  
из алюминия (магнитная проницаемость  $\mu = 1,000023$ );  
из стали ( $\mu = 8000$ );  
цилиндрического сосуда с водой ( $\mu = 0,999991$ ).



# Силы Ампера и Лоренца

## Изучив эту тему,

- ♦ вы узнаете, как в СИ вводится единица измерения силы тока 1 А и единица измерения модуля вектора магнитной индукции 1 Тл;
- ♦ поймете, как рассчитать величину и определить направление силы действующей на проводник с током и на заряженную частицу, находящуюся в магнитном поле;
- ♦ примените эти знания для определения вида траектории заряженных частиц в магнитном поле технических устройств, используемых в науке и в быту

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

Магнитное поле, в отличие от электрического, действует только на *движущийся* заряд. Исторически так сложилось, что раздельно рассматривают силы, действующие на заряд, направленно перемещающийся по проводнику (электрический ток) и на заряд, движущийся свободно (например на ион в вакууме).

## Сила Ампера

$\vec{F}_a$  — сила, действующая на проводник с током, помещенный в магнитное поле.

## Основные понятия:

Сила Ампера • Сила Лоренца • Правило левой руки

## Определение направления силы Ампера

Направление  $\vec{F}_a$  легко определить по **правилу левой руки**, если проводник с током расположен перпендикулярно вектору магнитной индукции  $\vec{B}$  магнитного поля. Четыре пальца (с указательного по мизинец) надо направить вдоль тока, повернуть руку так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, тогда большой палец, отведенный на  $90^\circ$  от указательного, покажет направление силы Ампера (рис. 165).

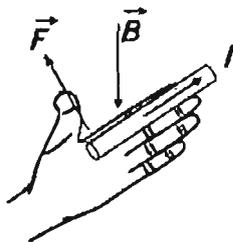


Рис. 165

Если направление проводника с током не перпендикулярно вектору  $\vec{B}$ , надо разложить вектор  $\vec{B}$  (рис. 166) на составляющие: вдоль проводника  $\vec{B}_{||}$  и перпендикулярно ему  $\vec{B}_{\perp}$ ; затем применить правило левой руки для составляющей  $\vec{B}_{\perp}$ . Вектор  $\vec{B}_{||}$ , направленный вдоль проводника, не оказывает действия на ток. Это правило справедливо во всех случаях.

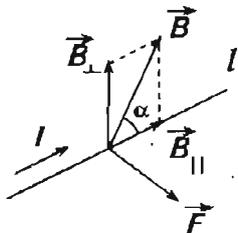


Рис. 3.37.

### Модуль вектора силы Ампера $F_a$

Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, возрастает с ростом силы тока  $I$  в проводнике, ростом вектора магнитной индукции поля  $\vec{B}$ , увеличением длины проводника  $l$ , зависит от угла  $\alpha$  между направлением проводника и направлением вектора  $\vec{B}$ .

$$F_a = IlB \sin \alpha.$$

Как видно из формулы, сила максимальна, когда  $\alpha = 90^\circ$ , т. е. проводник располагается перпендикулярно линиям магнитной индукции. Это было использовано при введении единицы измерения модуля вектора магнитной индукции 1 Тл.

**Единица измерения силы тока.** В СИ единица измерения силы тока — 1 А является основной единицей. Через нее определяются единицы многих электромагнитных величин: заряда — 1 Кл = 1 А · 1 с; вектора магнитной индукции — 1 Тл =  $\frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}}$  и других.

1 А — это такая сила тока, при которой два параллельных длинных проводника, расположенных на расстоянии 1 м друг от друга, взаимодействуют с силой в  $\approx 2 \cdot 10^{-7}$  Н в расчете на 1 м длины проводника.

### Сила Лоренца

$\vec{F}_L$  — сила, действующая в магнитном поле на свободный заряд  $q$ , движущийся в пространстве со скоростью  $v$ .

#### Направление силы Лоренца

Направление силы, действующей на свободный положительный заряд, определяется так же, как и на ток в проводнике, ведь направление тока совпадает с перемещением положительных частиц в проводнике. Таким образом, для определения направления  $\vec{F}_L$  надо воспользоваться правилом левой руки. Только вместо направления тока в проводнике надо выбрать направление скорости частицы (рис. 167).

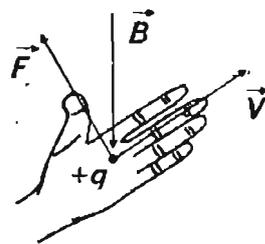


Рис. 167

Для отрицательно заряженных частиц при определении направления  $\vec{F}_L$  надо применить правило левой руки, затем сменить направление на  $180^\circ$ . То есть, при одинаковом направлении векторов скорости частицы и магнитной проекции поля, действующего на частицу, силы  $\vec{F}_L$  будут противоположно направлены для положительно и отрицательно заряженных частиц.

**Модуль силы Лоренца** возрастает с ростом заряда частицы  $q$ , ее скорости  $v$  и модуля вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ . Она также зависит от угла  $\alpha$  между вектором скорости  $\vec{v}$  и вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ .

$$F_L = qvB \sin \alpha.$$

#### Движение заряженной частицы под действием силы Лоренца в однородном магнитном поле

Особенностью силы Лоренца, действующей на заряженную частицу в магнитном поле, является то,

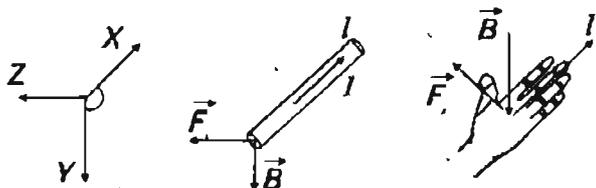
**Законы в виде формул**

**Модуль силы Ампера**

$$F_a = I l B \sin \alpha$$

**Направление силы Ампера**

**Правило левой руки** (применяется, если вектор магнитной индукции перпендикулярен проводнику)



Примечание: При произвольном расположении вектора магнитной индукции относительно направления проводника, выполняют предварительное разложение вектора магнитной индукции на вектор, перпендикулярный проводнику и вектор, параллельный ему

$$\vec{B} = \vec{B}_\perp + \vec{B}_\parallel$$

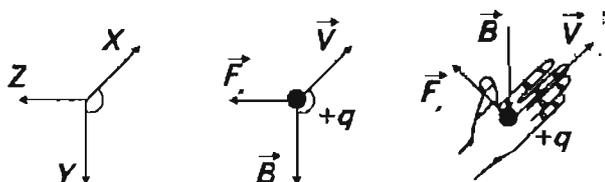
**Модуль силы Лоренца**

$$F_L = |q| v B \cdot \sin \alpha$$

**Направление силы Лоренца**

Для  $q > 0$

**Правило левой руки** (применяется, если вектор магнитной индукции перпендикулярен проводнику. При произвольном расположении вектора магнитной индукции относительно направления проводника см. примечание выше)



Для  $q < 0$

**Правило левой руки** и направление  $F_L$  противоположное направлению  $F_L$  для положительно заряженной частицы

**Обозначения величин, единицы измерения в СИ, справочные значения констант**

$F_a$  — модуль силы, действующей на проводник с током, помещенный в магнитное поле, Н  
 $I$  — сила тока в проводнике, А  
 $B$  — модуль вектора магнитной индукции поля, Тл  
 $l$  — длина проводника, м  
 $\alpha$  — угол между направлением тока в проводнике и направлением вектора  $B$

Вектор  $\vec{B}$  — в ладонь

Вектор  $\vec{I}$  — вдоль 4-х пальцев

Вектор  $\vec{F}$  — большой палец, отведенный на  $90^\circ$  от указательного

$F_L$  — модуль силы, действующей в магнитном поле на движущуюся частицу, Н  
 $q$  — заряд частицы, Кл  
 $v$  — скорость частицы,  $\frac{m}{c}$

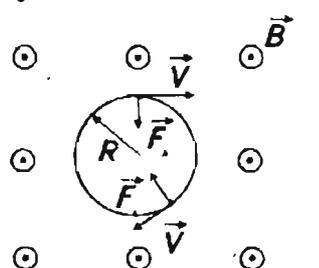
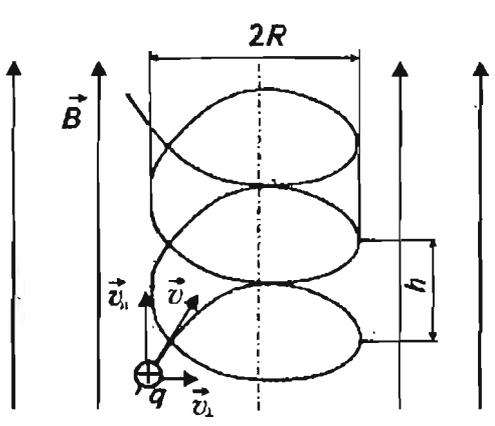
$\alpha$  — угол между вектором скорости  $v$  и вектором магнитной индукции  $B$

Вектор  $\vec{B}$  — в ладонь

Вектор  $\vec{v}$  — вдоль 4-х пальцев

Вектор  $\vec{F}$  — большой палец, отведенный на  $90^\circ$  от указательного

## Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

Законы в виде формул	Обозначения величин, единицы измерения в СИ, справочные значения констант
Угол между $\vec{v}$ и $\vec{B}$ равен $90^\circ$	
<p>Траектория — окружность радиуса <math>R</math></p> $R = \frac{mv}{qB}$  <p>Период вращения</p> $T = \frac{2\pi m}{qB}$	<p><math>m</math> — масса частицы, кг</p> <p><math>v</math> — скорость частицы, <math>\frac{м}{с}</math></p> <p><math>B</math> — модуль вектора магнитной индукции, Тл</p> <p><math>R</math> — радиус траектории, м</p> <p><math>q</math> — заряд частицы, Кл</p> <p><math>F_n</math> — модуль силы, действующей в магнитном поле на движущуюся частицу, Н</p> <p><math>T</math> — период вращения частицы, с</p>
Угол между $\vec{v}$ и $\vec{B}$ равен $\alpha$	
<p>Траектория — винтовая линия радиуса</p> $R = \frac{mv \cdot \sin \alpha}{qB}$ <p>с шагом</p> $h = \frac{2\pi v \cdot \cos \alpha}{qB}$ 	<p><math>\alpha</math> — угол между вектором скорости частицы и вектором магнитной индукции <math>B</math></p> <p><math>h</math> — шаг винтовой линии, по которой движется частица</p> <p><math>\vec{v}_{  }</math> — модуль проекции скорости частицы на направление вектора индукции магнитного поля</p> <p><math>\vec{v}_{\perp}</math> — модуль проекции вектора скорости частицы на направление, перпендикулярное вектору индукции магнитного поля</p>

что она всегда перпендикулярна вектору скорости частицы, поворачивается вместе с изменением направления частицы, поэтому не может изменить модуль вектора скорости частицы, а меняет только направление вектора скорости.

Если частица влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции, то она начинает двигаться по дуге окружности, как показано на рис. 168.

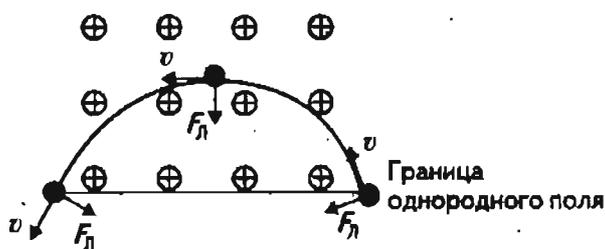


Рис. 168

Радиус этой окружности  $R$  легко рассчитывается из соображений, что сила Лоренца  $\vec{F}_L$  будет всегда направлена в центр этой окружности и будет сообщать частице центростремительное ускорение  $a_{цс}$ :

$$F_L = ma_{цс};$$

$$qvB = \frac{mv^2}{R};$$

где  $m$  — масса частицы. Откуда:

$$R = \frac{mv}{qB}.$$

Если частица влетает в магнитное поле под углом  $\alpha$  к вектору  $\vec{B}$ , то движение частицы будет происходить по винтовой линии. Действительно, движение частицы в пространстве можно всегда описать как совокупность движений по трем осям. Если разложить начальный вектор скорости на проекции  $v_{\perp}$  и  $v_{\parallel}$  на оси, перпендикулярную и параллельную вектору  $\vec{B}$ , то движение вдоль  $\vec{B}$  можно охарактеризовать как равномерное прямолинейное со скоростью  $v_{\parallel}$ . Движение в направлении перпендикулярном  $\vec{B}$  будет представлять собой равномерное движение по окружности (с ускорением  $a_{цс}$ ) со скоростью  $v_{\perp}$ . Тогда частица будет двигаться по винтовой траектории с радиусом

$$r = \frac{mv_{\perp}}{qB}$$

и шагом

$$h = v_{\parallel} T = v_{\parallel} \cdot \left( \frac{2\pi r}{v_{\perp}} \right),$$

где  $T$  — время одного оборота или период.

### 1. Оценка модуля вектора магнитной индукции подковообразного магнита

**Цель:** использование силы Ампера для определения вектора магнитной индукции однородного поля.

**Оборудование:** подковообразный магнит, катушка с известным числом витков, весы с разновесами, нить, амперметр, реостат, ключ, источник тока, линейка, штатив с лапками.

**Ход работы**

1. Возьмите из набора в практикуме школы небольшую катушку с известным числом витков  $N$  или изготовьте ее сами.
2. Определите ее массу  $M$  взвешиванием.
3. Закрепите катушку на двух нитях в лапке штатива так, чтобы катушка на 2 см углубилась в пространство между полюсными наконечниками подковообразного магнита и могла свободно колебаться, не вращаясь вокруг своей оси, как показано на рис. 169. При этом нити надо закрепить немного выше центра тяжести катушки.

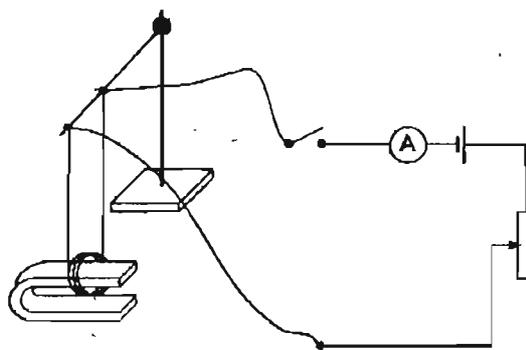


Рис. 169

4. Соберите электрическую цепь, позволяющую пропускать ток по катушке, регулировать его и измерять силу тока.
5. Реостатом отрегулируйте силу тока так, чтобы катушка отклонялась от вертикали на 1–2 см, не выходя из зазора магнита.
6. При этом положении движка реостата измерьте силу тока  $I$ , отклонение  $X$ , и длину нити  $L$  от точки подвеса на штативе до места крепления на катушке (рис. 170).

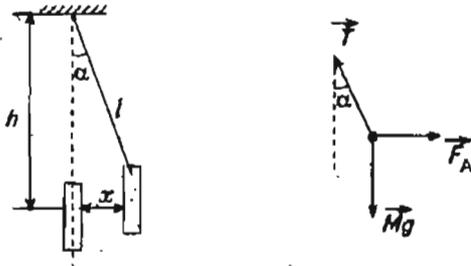


Рис. 170

7. Как видно из рис. 170, при равновесии катушки сила Ампера  $F_a$  уравнивает векторную сумму силы тяжести и силу натяжения нити и равна:

$$F_a = Mg \operatorname{tg} \alpha \approx \frac{Mgx}{h} \approx \frac{Mgx}{L}$$

Зная зависимость модуля силы Ампера от характеристик проводника с током и магнитного поля при перпендикулярном расположении  $\vec{B}$  и  $l$ :

$$F_a = I l B N,$$

можно легко получить:

$$B = \frac{Mgx}{I l N}.$$

Для оценок мы можем считать, что магнитное поле присутствует только в зазоре между полюсами и оно однородно. Тогда за длину проводника можно принять длину дуги катушки, заходящей в зазор между полюсами, или ширину полюсных наконечников подковообразного магнита.

8. Измерьте ширину полюсного наконечника магнита и проведите оценку модуля вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  в зазоре подковообразного магнита. Результат расчета понадобится вам для выполнения следующей работы.

## 2. Оценка скорости движения электронов в электронно-лучевой трубке

Цель: ознакомление с устройством электронно-лучевой трубки осциллографа; использование знаний о силе Лоренца для определения скорости движущегося заряда.

Оборудование: подковообразный магнит с рассчитанным модулем вектора  $B$  магнитной ин-

дукции между полюсными наконечниками (из лабораторной работы 1), линейка, осциллограф (электронно-лучевая трубка).

### Ход работы

1. По макету или рисунку ознакомьтесь с устройством электронно-лучевой трубки ЭЛТ (рис. 171).

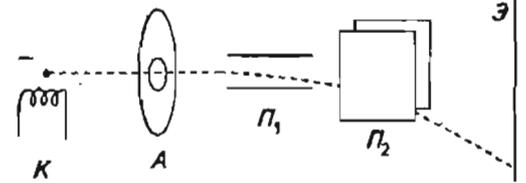


Рис. 171

Электроны, вылетая с раскаленного катода  $K$ , разгоняются, перемещаясь к положительно заряженному аноду  $A$ , пролетают через отверстие в аноде, а затем между двумя парами плоских отклоняющих пластин ( $\Pi_1, \Pi_2$ ) и попадают на экран  $\mathcal{E}$ , покрытый слоем люминофора. Экран светится под действием электронных ударов. Есть в электронно-лучевой трубке еще и специальные фокусирующие электроды, которые сжимают пучок электронов.

2. Таким образом, при включении ЭЛТ на экране возникает светящаяся точка, которая указывает место падения электронов на экран. Можно сдвинуть «точку», вращая ручки горизонтального и вертикального перемещения луча, то есть подавая напряжение на пластины  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ . Вы можете сместить «электронный луч», поднося вплотную к экрану с наружной стороны подковообразный магнит, как показано на рис. 172.

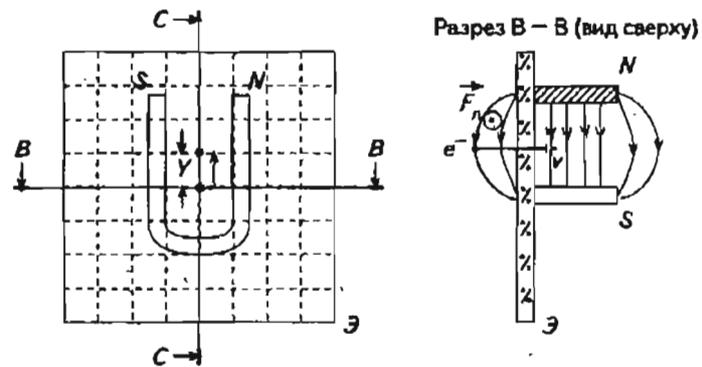


Рис. 172

Магнитное поле, проникая внутрь ЭЛТ, искривляет траекторию движения электронов, так как на них начинает действовать сила Лоренца.

Считая, что магнитное поле простирается на расстояние, равное примерно ширине полюсных наконечников магнита, можно оценить скорость подлета электронов к экрану (см. п. 5).

- Установите след электронного луча («светящуюся точку») в центре экрана, вращая ручки вертикального и горизонтального смещения луча ЭЛТ или осциллографа. Осторожно прижмите подкову магнита к экрану и измерьте линейкой смещение  $y$  луча.
- Зарисуйте положение магнита относительно экрана, начальное и конечное положение луча на экране. Укажите направление линий магнитной индукции между полюсами магнита, направление движения электронов и определите направление силы Лоренца, применив правило «левой руки». Не забудьте, что электрон отрицательно заряжен. Соответствует ли отклонение электронов направлению силы Лоренца?
- Как видно из рис. 173, радиус кривизны траектории  $R$ , толщина слоя  $d$ , где действует магнитное поле и смещение  $y$  связаны из треугольника  $ABC$  соотношением:

$$(R - y)^2 + d^2 = R^2;$$

откуда:

$$R = \frac{y^2 + d^2}{2y}.$$

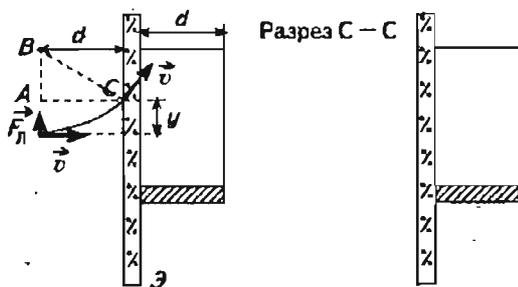


Рис. 173

Зная, что:

$$R = \frac{mv}{qB},$$

получаем формулу для оценки скорости электрона  $v$ :

$$v = \frac{qB(y^2 + d^2)}{2ym}.$$

Значения  $q$  и  $m$  возьмите из таблиц, а модуль вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  из лабораторной работы 1.

- Если известно напряжение  $U$  между ускоряющими электродами в ЭЛТ, то проведите оценку  $v$ , исходя из закона сохранения энергии:

$$\frac{mv^2}{2} = qU.$$

В случае сильного расхождения результатов проанализируйте, какие предположения в этой работе являются наиболее грубыми и неточными.

*Самостоятельная работа*

### Обучающий тест

#### Уровень А

- Линии магнитной индукции поля идут слева направо параллельно плоскости листа, проводник с током перпендикулярен плоскости листа, и ток направлен в плоскость тетради. Вектор силы Ампера, действующей на проводник, направлен...
 

<input type="checkbox"/> А. вправо.	<input type="checkbox"/> Б. влево,
<input type="checkbox"/> В. вверх.	<input type="checkbox"/> Г. вниз.
- Проводник с током лежит в плоскости листа. По проводнику снизу проходит ток, и на него вверх действует сила Ампера, направленная от листа. Это может происходить, если северный полюс стержневого магнита поднесли...
 

<input type="checkbox"/> А. слева.
<input type="checkbox"/> Б. справа.
<input type="checkbox"/> В. с передней стороны листа.
<input type="checkbox"/> Г. с обратной стороны листа.
- На рис. 174 показаны скорость  $\vec{v}$  положительной заряженной частицы, влетевшей между полюсами подковообразного магнита, и сила Лоренца  $\vec{F}$ , действующая на частицу.

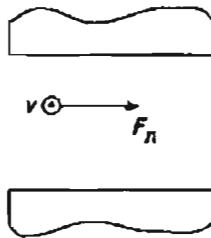


Рис. 174

Положение полюсов магнита на рисунке...

- А. сверху северный, снизу южный.  
 Б. снизу северный, сверху южный.  
 В. на положительно заряженные частицы сила Лоренца не действует.  
 Г. для ответа надо знать величину скорости.
4. Какая формула соответствует выражению для модуля силы Ампера?

- А.  $F = qE$ .  
 Б.  $F = qvB \sin \alpha$ .  
 В.  $F_1 = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0 r^2}$ .  
 Г.  $F = IB \sin \alpha$ .

5. Прямой проводник длиной  $l = 0,1$  м, по которому течет ток  $I = 3$  А, находится в однородном магнитном поле. Модуль вектора магнитной индукции  $B = 4$  Тл. Проводник расположен под углом  $60^\circ$  к вектору  $\vec{B}$ . Чему равна сила, действующая на проводник со стороны магнитного поля?

- А. 0,6 Н.       Б. 1 Н.  
 В. 1,4 Н.       Г. 2,4 Н.

6. Частица влетела в однородное магнитное поле со скоростью  $v$ , при этом на нее начала действовать сила  $F$ . Если в ту же точку поля под тем же углом та же частица влетит со скоростью в 2 раза большей, то сила, действующая на нее, будет равна...

- А.  $F$ .       Б.  $2F$ .  
 В.  $4F$ .       Г.  $\frac{F}{2}$ .

### Уровень Б

1. Провод, по которому течет ток от наблюдателя, висит на подводящих проводах над вертикально

расположенной катушкой и при ее подключении отклоняется вправо, как показано на рис. 175.

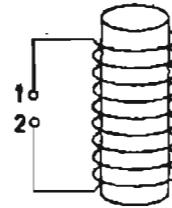
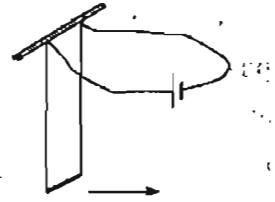


Рис. 175

Это означает, что к клеммам 1 и 2 катушки подключили...

- А. + и -.  
 Б. - и +.  
 В. переменное напряжение.  
 Г. такое невозможно.

2. В магнитном поле с индукцией  $B = 4$  Тл движется электрон со скоростью  $10^7 \frac{м}{с}$ , направленной перпендикулярно линиям магнитной индукции. Чему равен модуль силы  $F$ , действующей на электрон со стороны магнитного поля?

- А.  $0,4 \cdot 10^{-12}$  Н.  
 Б.  $6,4 \cdot 10^{-12}$  Н.  
 В.  $0,4 \cdot 10^{-26}$  Н.  
 Г.  $6,4 \cdot 10^{-26}$  Н.

3. Электрон с зарядом  $e$  влетает в магнитное поле, модуль вектора магнитной индукции которого  $B$ , со скоростью  $v$  перпендикулярно линиям магнитной индукции. Какое выражение соответствует радиусу орбиты электрона?

- А.  $\frac{mve}{B}$ .       Б.  $\frac{mvB}{e}$ .  
 В.  $\frac{eB}{mv}$ .       Г.  $\frac{mv}{eB}$ .

4. Какова траектория протона, летящего в однородном магнитном поле под углом  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$  к вектору магнитной индукции  $\vec{B}$ ?

- А. Прямая.
- Б. Парабола.
- В. Окружность.
- Г. Винтовая линия.

5. Частица влетела в однородное магнитное поле со скоростью  $v$ , при этом на нее начала действовать сила  $F$ . Если в ту же точку поля под тем же углом та же частица влетит с кинетической энергией в 4 раза большей, то сила, действующая на нее, будет...

- А.  $F$ .
- Б.  $2F$ .
- В.  $4F$ .
- Г.  $\frac{F}{4}$ .

*Тренировки по решению задач*

**Уровень А**

**Пример решения задачи**

В опытах Ампера было показано, что два параллельных проводника с токами, текущими в одном направлении, притягиваются друг к другу. Воспользовавшись знаниями о картине линий магнитной индукции вокруг проводника с током и направлении силы Ампера, покажите, что этот эксперимент можно объяснить тем, что один проводник с током попадает в магнитное поле, созданное другим током.

**Решение.** Пусть оба тока расположены так, что уходят в тетрадь (рис. 176 а). Правый из них создает магнитное поле, направление линий магнитной индукции которого можно определить, воспользовавшись правилом буравчика.

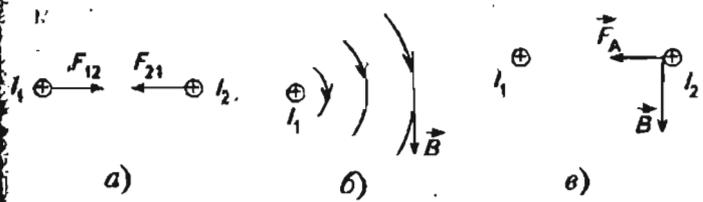


Рис. 176

Применение правила буравчика показывает, что в точке пространства, где расположен второй провод, первый создает магнитное поле, направленное вертикально вниз (рис. 176 б).

Теперь поместим в это поле второй проводник с током и определим направление силы Ампера, действующей на второй ток со стороны магнитного поля, созданного первым током. Для этого воспользуемся правилом левой руки. Левую руку расположим так, чтобы вектор  $\vec{B}$  входил в ладонь, т. е. ладонью кверху. Направим четыре пальца вдоль второго тока, т. е. в тетрадь. Тогда отогнутый большой палец покажет, что сила Ампера, действующая на второй провод, направлена в сторону первого тока.

Аналогично можно объяснить действие магнитного поля, созданного вторым током, и найти направление силы Ампера, действующей на первый проводник с током.

- Известно, что 1 Ампер — это такая сила тока, при которой два параллельных длинных проводника, расположенных на расстоянии 1 м, взаимодействуют с силой  $\approx 2 \cdot 10^{-7}$  Н в расчете на 1 м длины проводника. Каков при этом модуль вектора магнитной индукции поля, создаваемого одним током вблизи другого?
- Рамка с током висит в однородном магнитном поле, как показано на рис. 177.

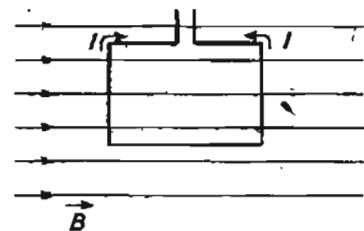


Рис. 177

Нарисуйте силы, действующие на каждую из сторон рамки.

- На рис. 178 показано несколько вариантов расположения прямого провода, по которому течет ток  $I$  в магнитном поле  $\vec{B}$ . Нарисуйте направление силы Ампера, действующей на ток.

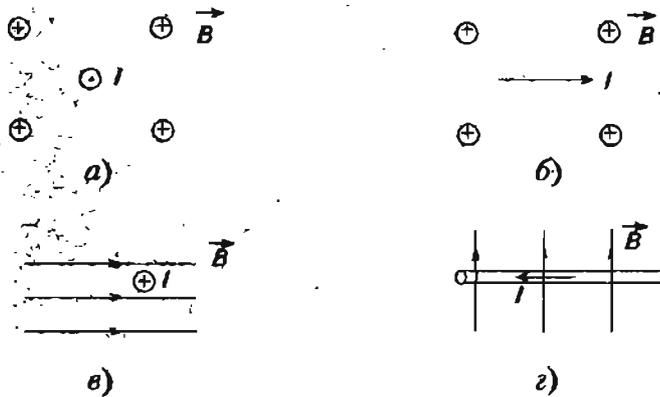


Рис. 178

4. Под каким углом к вектору магнитной индукции расположен проводник длиной 10 см, если на него в поле 0,01 Тл действует сила в  $2,5 \cdot 10^{-3}$  Н при силе тока в проводнике 5 А.
5. В магнитное поле влетают три частицы, имеющие положительный заряд, отрицательный заряд и не имеющая заряда (рис. 179). Нарисуйте силы, действующие на частицы?

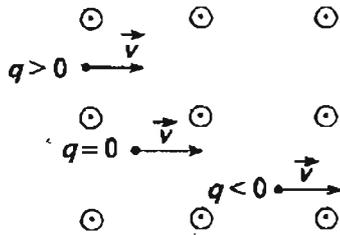


Рис. 179

6. Электрон влетает перпендикулярно магнитным силовым линиям в магнитное поле с вектором магнитной индукции 0,01 Тл со скоростью  $10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Какая сила начнет на него действовать и изменится ли при этом модуль вектора скорости электрона? Какова будет траектория частицы?

### Уровень Б

#### Пример решения задачи

Ионы  $\text{Co}^{2+}$  и  $\text{Co}^{3+}$  влетают со скоростью  $2 \cdot 10^5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  в однородное магнитное поле ( $B = 0,5$  Тл) перпендикулярно границе поля и его линиям магнитной индукции. На сколько отстоят точки их вылета из поля, если влетают они в одной и той же точке?

Дано:  $q_1 = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;  
 $q_2 = 3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;  
 $B = 0,5$  Тл;  
 $v = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;  
 $M = 59 \cdot 10^{-3}$  кг;  
 $\Delta X - ?$

Решение. Пусть силовые линии магнитного поля выходят из плоскости тетради, а ионы движутся в плоскости тетради, как показано на рис. 180.

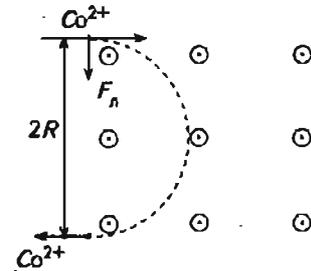


Рис. 180

Применив правило левой руки для положительных ионов, двигающихся в магнитном поле, установим, что сила Лоренца, действующая на оба иона в момент проникновения в магнитное поле направлена вертикально вниз. Значит, векторы скорости ионов начнут поворачиваться вниз. Но вместе с вектором скорости будет поворачиваться и вектор силы Лоренца. Поэтому ионы станут двигаться по окружности без изменения модуля вектора скорости, т. е. сила Лоренца будет сообщать им центростремительное ускорение.

Массы ионов  $\text{Co}^{2+}$  и  $\text{Co}^{3+}$  практически одинаковы (отличаются одна от другой на массу одного электрона, что мало по сравнению с массой атома).

Следовательно:

$$m = \frac{M}{N}.$$

Однако силы Лоренца  $F_n = qvB$  будут различаться в 1,5 раза из-за отличия заряда ионов. Поэтому радиус  $R_1$  окружности, по которой движется ион  $\text{Co}^{2+}$ , будет больше, чем  $R_2$  для  $\text{Co}^{3+}$ :

$$q_1 v B = \frac{m v^2}{R_1};$$

$$q_2 v B = \frac{m v^2}{R_2}.$$

Поскольку в магнитном поле каждая частица до вылета совершит ровно половину оборота, то искомое расстояние между точками вылета ионов:

$$\Delta X = 2R_1 - 2R_2 = \frac{2Mv}{BN_a} \left( \frac{1}{q_1} - \frac{1}{q_2} \right) = 0,08 \text{ (м)}.$$

Ответ: 8 см.

7. Ампер при исследовании токов использовал для своих опытов модифицированные весы, где действие силы на проводник, скрепленный с одной чашей, уравновешивалось добавлением гирек на другую чашу. В какое поле попадал его прямой провод длиной 20 см, если при пропускании через него тока в 5 А на вторую чашу добавляли гирьку в 1 г? Магнитное поле создавалось другим проводом с током, параллельным первому.

8. В вертикальном магнитном поле ( $B = 0,01$  Тл) перпендикулярно его линиям магнитной индукции на легких проводах длиной 50 см подвешен прямой медный стержень длиной 10 см. При пропускании через него тока в 10 А он отклонился от вертикали на  $30^\circ$ . Какова масса стержня? Силы, действующие на подводящие провода, не учитывать.

9. Положительно заряженная частица влетает в однородное магнитное поле, имеющее прямолинейную границу, перпендикулярно линиям магнитной индукции, как показано на рис. 181.

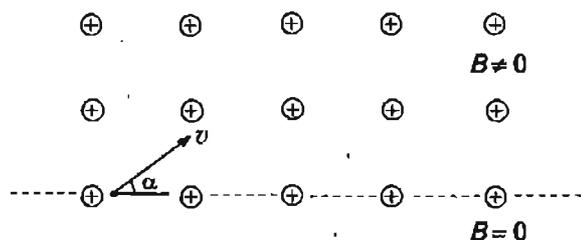


Рис. 181

Нарисуйте траекторию ее движения при разных углах между границей магнитного поля и вектором скорости и при разных скоростях влетающей частицы.

10. Две частицы с массами  $M_1$  и  $M_2$  и зарядами  $q_1$  и  $q_2$  ускорены до одинаковой кинетической энергии  $W$  и движутся по круговым траекториям в однородном магнитном поле. Как будут отличаться радиусы окружностей, по которым они движутся?
11. Рассчитайте период вращения электрона в магнитном поле с  $B = 1$  Тл перпендикулярно его линиям магнитной индукции. Как он зависит от скорости электрона?
12. Под каким углом к линиям магнитной индукции должна влететь заряженная частица в однородное магнитное поле, чтобы радиус спирали, по которой она движется, равнялся шагу этой спирали.

*Контрольная  
работа*

### Уровень А (рассчитана на 45 мин)

1. Сравните модули силы Лоренца, действующей на заряженную частицу ( $q = 10^{-6}$  Кл) и силы Ампера, действующей на проводник с током длиной 0,05 м в однородном магнитном поле ( $B = 10^{-2}$  Тл). Частица движется перпендикулярно линиям магнитной индукции со скоростью  $2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , а проводник расположен под углом  $30^\circ$  к линиям. Сила тока в проводнике 0,5 А.
2. Изобразите на рисунке линии магнитной индукции однородного магнитного поля, вектор которого направлен за плоскость тетради; протон с вектором скорости, направленным вверх; силу, действующую на этот протон; примерную траекторию, по которой полетит протон.
3. Изобразите схематично установку по изучению силы Ампера, состоящую из: полосового магнита, расположенного вертикально; проводящего стержня, подвешенного над этим магнитом на гибких проводах; источника тока, соединенного с этими проводами; ключа, замыкающего электрическую цепь. Куда отклонится стержень, если по нему пустить ток? Что нужно сделать, чтобы он отклонился в другую сторону?

### Уровень Б (рассчитана на 45 мин)

1. Для определения единиц каких физических величин используется сила Ампера? Дайте определения этих величин?

2. Электрон со скоростью  $2 \cdot 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  влетает в точку А в однородное магнитное поле, имеющее границу, перпендикулярно этой границе и линиям магнитной индукции поля. Определите модуль вектора магнитной индукции однородного поля, если электрон вылетел из него на расстоянии 10 см от точки А.
3. В однородном магнитном поле ( $B = 0,02$  Тл), вектор магнитной индукции которого направлен под углом  $60^\circ$  к горизонту, висит квадратная рамка со сторонами 5 см, и с силой тока в ней 4 А. Какие силы действуют на стороны рамки в момент, когда нижняя сторона ее перпендикулярна линиям магнитной индукции. Показать направление сил на чертеже.

*Творческие  
задания*

### Уровень А

1. Подготовьте реферат на тему «Исследование Ампером взаимодействия токов».

### Уровень Б

1. Подготовьте реферат на тему «Воззрения Ампера на природу магнетизма веществ».
2. Подготовьте реферат на тему «Использование силы Лоренца при исследовании свойств заряженных частиц от Дж. Дж. Томсона до наших дней (ЭЛТ, ускорители и масс-спектрометры)».



# Применение электроприборов в быту и технике

## Изучив эту тему,

- вы узнаете о принципах действия некоторых современных электроприборов;
- поймете, что такое КПД электроприбора;
- примените свои знания для расчета расхода электроэнергии бытовыми электроприборами

## Основные понятия:

Постоянный и переменный ток • Расход электроэнергии • Коэффициент полезного действия электроприбора • Электродвигатель • Магнитный носитель информации • Полупроводниковый диод • Терморезистор • Транзистор

*Конспект.*

*Таблицы. Ссылки*

Со времен создания источников тока человечество использует энергию разделенных зарядов для облегчения своего труда и для развлечений. Особенно широко стала использоваться электроэнергия после изобретения генераторов переменного тока и трансформаторов. Они позволяют преобразовывать механическую энергию (движущиеся пары пара, вода, ветер) в электрическую и передавать ее на большие расстояния. При этом решается проблема разделения мест выработки электроэнергии и ее потребления.

## Приборы постоянного и переменного тока

Хотя основная масса бытовых электроприборов работает на переменном токе, принципы преобразо-

вания электроэнергии в них мало отличаются от принципов работы приборов постоянного тока. В ряде случаев даже вводят искусственные характеристики переменного тока, которые позволяют при расчетах пользоваться законами постоянного тока. К таким характеристикам относится, например, действующее значение переменного напряжения. Мы часто используем выражение «напряжение в сети 220 В», не отдавая себе отчет в том, что на самом деле на клеммах сетевой розетки 50 раз в секунду значение напряжения меняется от 0 до 311 В, меняя при этом свою полярность. То же самое можно сказать о токе, протекающем через электроприборы. Однако, используя в нижеприведенных формулах действующие (усредненные)

значения напряжений и токов, можно получить верные выводы о расходовании и преобразовании электроэнергии в этих приборах.

В последние годы с увеличением числа бытовых средств телекоммуникаций (радиотелефоны, плееры, транзисторные приемники и т. п.) резко увеличился выпуск источников постоянного тока. Это, в основном, химические источники тока, позволяющие иметь переносной источник электроэнергии с достаточным ресурсом.

### Расход электроэнергии

Независимо от назначения прибора можно сказать, что он выполняет свою функцию вследствие прохождения через него тока  $I$ . Поскольку, по определению, напряжение  $U$  на входных клеммах — это отношение работы, которую нужно совершить для перемещения заряда  $q$  через прибор к перемещаемому заряду, то ясно, что расход электроэнергии  $W$  и будет равняться этой работе:

$$W = A = Uq = Ult,$$

где  $t$  — время работы прибора.

При этом потребляемая электроприбором мощность будет равна:

$$P = \frac{W}{t} = IU.$$

Единицей измерения электроэнергии мог бы служить 1 джоуль, однако для подсчета расходов электроэнергии в быту и технике 1 Дж — слишком малая величина. Электролампа мощностью 100 Вт за 1 ч работы потребляет 360 000 Дж энергии. По этой причине для измерения потребления электроэнергии широко распространена единица 1 киловатт-час. В примере с лампой расход составляет 0,1 кВт-час.

### Коэффициент полезного действия (КПД) электроприборов

Коэффициент полезного действия электроприборов определяется в зависимости от их назначения. В общем случае это отношение энергии, пошедшей на выполнение требуемой работы, к общему расходу электроэнергии, выраженное в процентах.

$$\eta = \frac{W_{\text{полезн}}}{IUt}$$

В отличие от других устройств, электронагревательный прибор может иметь КПД близкий к 100%. Если его назначение — нагревание не всей

окружающей среды, а конкретного объекта (например воды в электрочайнике), то рассеяние теплоты в воздухе уже не входит в полезно затраченную энергию.

Электромеханический прибор (электродвигатель) неизбежно тратит часть энергии на обогревание проводов, которые движутся в магнитном поле и могут совершать механическую работу. Кроме того, двигающиеся части могут переводить в теплоту часть уже полученной механической работы. Поэтому КПД электродвигателя — это отношение механической работы, совершаемой двигателем, к расходу электроэнергии. Один и тот же электродвигатель при совершении работы в разных режимах (поднимая тяжелый или легкий груз, делая это с большей или с меньшей скоростью) может иметь разный КПД. Поэтому говорят о КПД в номинальном режиме или о максимально возможном КПД электродвигателя.

В разных местах пособия уже упоминалось о КПД источника тока, лампы накаливания и т. д. Можно также говорить о КПД звуковых динамиков, имея

Законы в виде формул	Обозначения величин, единицы измерения в СИ, справочные значения констант
Расход электроэнергии $W = Ult$	$W$ — потребляемая прибором электроэнергия, 1 Дж или 1 кВт-ч = $3,6 \cdot 10^6$ Дж
Потребляемая электроприбором мощность $P = \frac{W}{t} = IU$	$t$ — время работы прибора, с $U$ — напряжение на клеммах работающего прибора, В $I$ — сила тока через прибор, А
КПД электроприборов $\eta = \frac{W_{\text{полезн}}}{IUt}$	$W_{\text{полезн}}$ — энергия, пошедшая на выполнение предназначения прибора, Дж $IUt$ — общий расход электроэнергии, Дж $\eta$ , безразмерная величина, измеряется в долях или процентах

ТИПЫ ЭЛЕКТРОПРИБОРОВ		
Назначение	Пример	Физическое явление, которое используется
Преобразование электроэнергии в тепло	Электрочайник, электроплита	Тепловое действие тока
Преобразование электроэнергии в энергию химических связей	Устройство для зарядки аккумуляторов, электролизер для получения водорода и кислорода и пр.	Химическое действие тока
Преобразование электроэнергии в механическую энергию	Электродвигатели пылесоса, фена, вентилятора, компрессора холодильника, подъемного крана, электровоза и т. д.	Магнитное действие тока
Использование электроэнергии для излучения электромагнитных волн: свет, ИК(тепловое) излучение, радиоволны, сверхвысокочастотное излучение, рентгеновское излучение	Теле- и радиопередатчики (радиоволны); радары аэродромов и СВЧ-печи; газоразрядные лампы и другие источники света; рентгеновские аппараты (в больницах и аэропортах)	Излучение электромагнитных волн при ускоренном движении заряда (например, при колебании или торможении электронов)
Использование электроэнергии для создания, хранения и передачи данных	Компьютеры, телефонные линии, лазерные диски, оптоволоконные линии связи и т. д.	Намагничивание материалов электромагнитами, распространение электромагнитных полей в вакууме и различных средах и др.

в виду отношение энергии звуковых волн к потребляемой энергии, КПД телевизора, вычитая из общих затрат электроэнергии затраты на нагревание проводов и других устройств, и т. п.

### Типы электроприборов

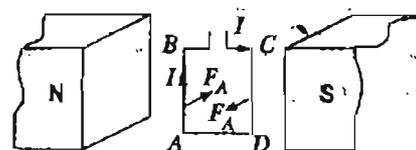
По назначению электробытовые приборы подразделяются на огромное число типов. В таблице ниже приведена классификация различных устройств по типам преобразования в них энергии.

### Устройство некоторых электроприборов

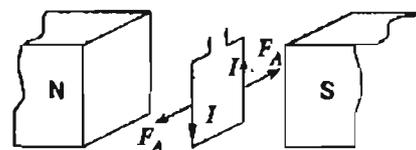
Некоторые электротехнические устройства уже были описаны в ходе раскрытия предыдущих тем (лампа накаливания, стрелочный амперметр, гальванический элемент, конденсатор, электронно-лучевая трубка, электрохимическая ячейка-электролизер). Здесь мы остановимся кратко на устройстве электродвигателя, магнитных запоми-

нающих устройств и особенностях полупроводниковых приборов.

**Электродвигатель.** Простейшей моделью двигателя может служить рамка по которой течет ток, помещенная между полюсами постоянного магнита, как показано на рис. 182.



a)



б)

Рис. 182

Как видно из рисунка, в положении *a*) силы Ампера, действующие на противоположные стороны рамки, будут вращать ее по часовой стрелке. Однако в положении *b*) рамка должна застопориться, и силы Ампера будут просто растягивать ее в разные стороны. Поэтому, когда рамка находится под углом в  $45^\circ$  к вектору магнитной индукции  $\vec{B}$ , можно отключить ее от источника тока и пустить ток по второй рамке, расположенной перпендикулярно к первой (рис. 183).

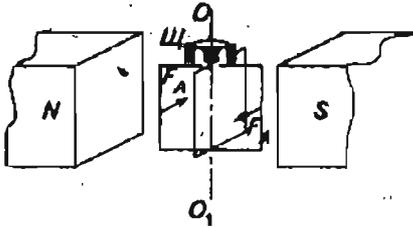


Рис. 183

Для этого служит конструкция, называемая **токопроводящими щетками**. Когда обе рамки сидят на одном валу ( $OO_1$ ), токоподводящие щетки ( $Ш$ ) перескакивают с концов одной рамки на другую.

**Электромагнит** представляет собой катушку с сердечником из мягкого ферромагнетика. Позволяет регулировать значение магнитной индукции поля вблизи него путем изменения числа витков обмотки и силы тока в ней. Используется в различных механизмах и устройствах, начиная от больших подъемных кранов для погрузки железосодержащих деталей и металлолома, до кинескопа телевизора (отклонение электронного пучка) и записывающей головки видеоманитфона и компьютера. Электромагниты являются составной частью таких устройств как генератор переменного тока, электродвигатель, реле для дистанционного отключения электрических цепей, электроклапанов для дистанционного пуска газов и жидкостей и т. д.

**Магнитный носитель данных (жесткий диск компьютера, лента магнитофона)**. Так как все данные для компьютера могут быть записаны в виде сигналов типа «да» — «нет», то они могут храниться на ленте или диске в виде намагниченных и ненамагниченных участков поверхности, покрытой материалом — жестким ферромагнетиком. Записывающая головка дисководов представляет собой электромагнит, который перемещается над поверхностью диска, разделенной на участки. При подаче тока на головку, область, над которой она «парит»,

намагничивается. Чередование намагниченных и ненамагниченных областей при считывании и регистрируется как чередование нулей и единиц, представляющих данные.

**Полупроводниковый терморезистор**. В отличие от металлических проводников у ряда материалов (кремний, германий) с ростом температуры происходит резкое снижение электрического сопротивления, как показано на графиках (рис. 184).

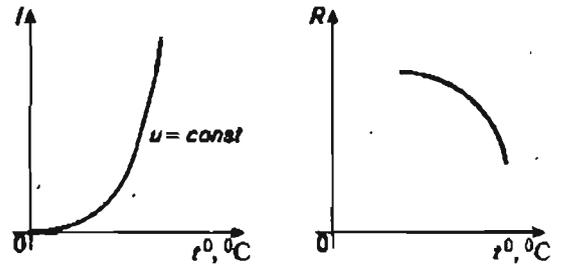


Рис. 184

Это объясняется тем, что, если число носителей тока (электронов) в металле велико и с ростом температуры в интервале  $20-1000^\circ\text{C}$  практически не меняется, то в полупроводниках число носителей при температуре, близкой к комнатной, очень мало, но резко возрастает с ее повышением. Эффект роста числа носителей тока перекрывает эффект усиления колебаний узлов кристаллической решетки, обычно увеличивающий сопротивление. Такие материалы могут использоваться в качестве чувствительных датчиков температуры (например, в противопожарных устройствах).

**Полупроводниковый диод**. Обычный проводник пропускает ток одинаково при смене его концов, присоединенных к разным полюсам источника постоянного тока (рис. 185).

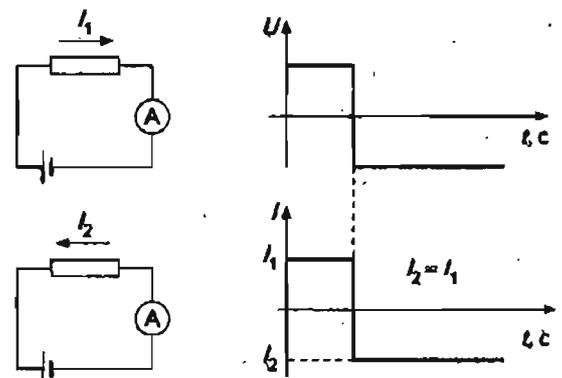


Рис. 185

Если же провести такие же измерения силы тока при разной полярности подключения диода к источнику тока, то зависимость будет совершенно иной. При одной полярности ток ничтожно мал, даже при значительных напряжениях (рис. 186).

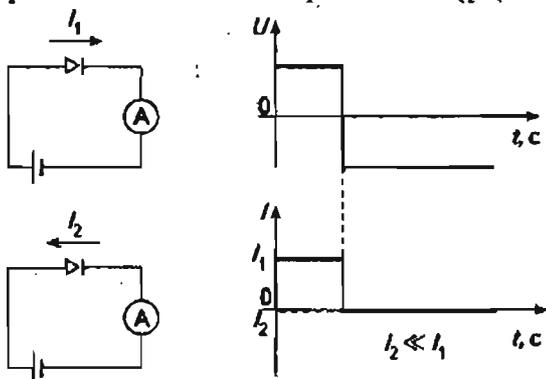


Рис. 186

Диод представляет собой сплавленные друг с другом кристаллы двух полупроводниковых материалов с разным типом проводимости (рис. 187).

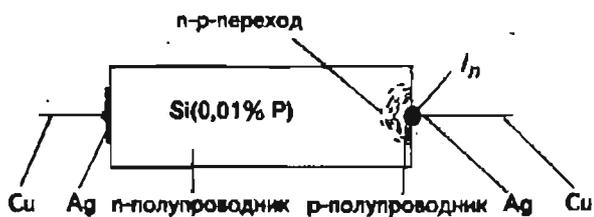


Рис. 187

Полупроводником *n*-типа является кристалл кремния, в решетку которого внедрены в небольшом количестве примесные атомы фосфора, не все электроны которого задействованы в образовании межатомных связей и поэтому являются свободными носителями зарядов. Полупроводники *p*-типа — это кристаллы кремния, в которых в качестве примеси присутствует индий, имеющий на своей внешней оболочке электронов меньше, чем кремний. В результате между атомами кремния и индия образуется вакансия, куда могут «перепрыгнуть» электроны, в свою очередь освобождая место для электронов от следующего атома. Говорят, что протекание тока за счет такого перемещения вакансий (дырок) называется *дырочной проводимостью*. На границе двух типов полупроводников происходит частичное смещение носителей тока, в результате *p-n* переход приобретает свойство пропускать большой ток только в одном направлении.

Диод широко используется в выпрямителях тока, где происходит преобразование переменного тока

в ток одной полярности или пульсирующий ток (рис. 188). Такой ток с помощью конденсаторов легко «сгладить», создав тем самым источник постоянного тока.

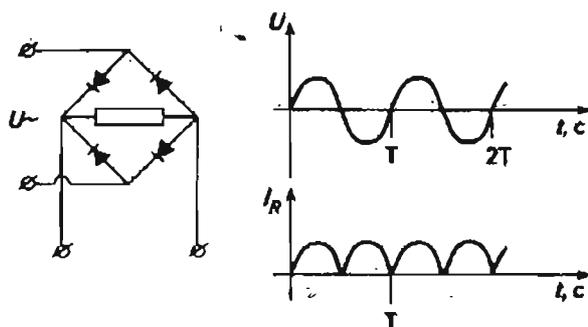


Рис. 188

Такие выпрямители используются для подзарядки аккумуляторных батарей, при работе устройств типа калькуляторов от сети переменного тока (адаптеры) и в других устройствах радиотехнического назначения.

Выпрямляющее действие полупроводникового диода основано на свойствах границы раздела полупроводников *p*-типа и *n*-типа — *p-n* перехода.

Если к зоне диода, где основные носители дырки (*p*-зона), присоединить клемму «+» источника тока, а к *n*-зоне, где основные носители тока электроны, клемму «-», то *p-n* переход открыт, и ток практически не испытывает сопротивления. При обратной полярности запирающий слой на границе зон не пропускает ток (рис. 189).



Рис. 189

Полупроводниковые усилители на транзисторах (триодах). Неотъемлемой частью всякого телекоммуникационного (осуществляющего передачу сигналов на расстоянии) устройства является усилитель электрических сигналов. Токи, возникающие в антеннах, принимающих радиоволны, малы. Необходимы усилители, которые бы, добавляя в систему энергию, увеличивали силу тока, делая это синхронно с изменяющимся во времени слабым током. Так, если поступающий сигнал представляет собой линейное нарастание тока, а затем его быстрый спад (рис. 190 а), то на выходе из устройства ток должен также линейно возрастать во времени, но до большего значения, а затем быстро спадать (рис. 190 б).

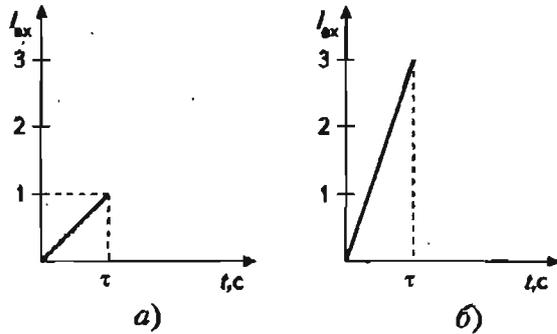


Рис. 190

Существуют усилители тока и напряжения. До 1948 г. использовались исключительно ламповые усилители. В настоящее время почти вся усиливающая аппаратура выполнена на полупроводниковых транзисторах. Их основными отличиями являются компактность, меньшие потери на нагревание устройств и, следовательно, меньшие затраты электроэнергии.

По способу изготовления транзистор мало отличается от диода (рис. 191).

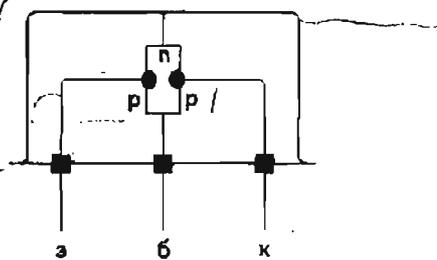


Рис. 191

На монокристалл германия с электронной проводимостью капают с двух сторон расплавленный индий, в результате возникают два  $p-n$  перехода и тонкий слой полупроводника  $n$ -типа. Кристалл укрепляется в металлическом корпусе, из которого выводится три проводника (отсюда название). Среднюю часть кристалла (полупроводник  $n$ -типа) называют базой, а две крайние области (полупроводники  $p$ -типа) эмиттером и коллектором.

При включении такого устройства в электрическую цепь по схеме, показанной на рис. 192, ток в переходе эмиттер-база не проходит, поскольку разомкнута цепь, а переход эмиттер-коллектор тоже закрыт, поскольку основные носители тока в зоне эмиттера (дырки) не могут преодолеть  $n-p$  переход зоны база-коллектор.

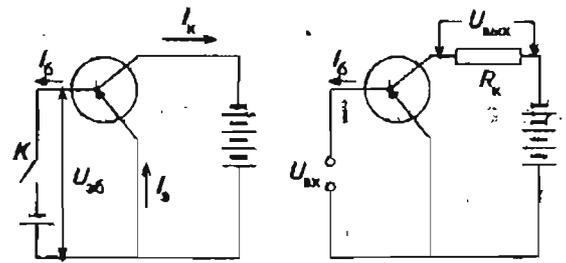


Рис. 192

При замыкании ключа  $K$ , т. е. подаче небольшого по сравнению  $U_{э-к}$  отрицательного напряжения на базу  $U_{э-б}$ , основные носители тока зоны эмиттера — дырки устремляются на базу, их заряд компенсируется электронами, которые поступают через электрод с базы. Дальнейшее перемещение дырок в базе происходит фактически не под действием электрического поля, а за счет диффузии от эмиттера, где их концентрация велика, к другим частям зоны. Зона базы в кристалле очень тонка, поэтому и дырки, и электроны, попавшие в эту зону, достаточно быстро достигают  $n-p$  перехода коллектора. Однако здесь их пути расходятся: для дырок этот переход открыт, для электронов — закрыт. Поэтому поток электронов с базы мал (ток базы мал), а поток дырок практически полностью достигает коллектора. Из закона сохранения заряда следует, что:

$$I_э = I_б + I_к$$

Таким образом, транзистор можно рассматривать, с одной стороны, как устройство, которое распределяет ток эмиттера на две части  $I_к \gg I_б$ , а с другой стороны, как ключ, который при подаче напряжения между эмиттером и базой, позволяет проходить значительному току от эмиттера к коллектору.

Если теперь включить в цепь коллектора большое сопротивление  $R_к$ , то при небольшом  $\Delta U_{кэ}$  увеличении  $U_{э-б}$  токи распределятся так, что  $I_э \approx I_к \gg I_б$  и увеличение напряжения на  $\Delta U_{кэ} R_к$  окажется больше, чем  $\Delta U_{кэ}$ . Поэтому говорят об усилении амплитуды электрического сигнала в таком усилителе за счет энергии батареи, включенной между эмиттером и коллектором. Возможно последовательное соединение таких усиливающих каскадов, либо изготовление микросхем, где на базе одного полупроводникового кристалла путем напыления слоев создается сложная система  $p-n$  переходов и их соединений проводящими дорожками.

*Лабораторные работы*

**1. Измерение КПД электродвигателя**

Цель: ознакомление на модели с устройством электродвигателя, закрепление понятия КПД электрического прибора.

Оборудование: модель электродвигателя, источник тока, ключ, реостат, амперметр, вольтметр, набор грузов, нить, линейка, штатив с лапками, часы с секундной стрелкой.

Ход работы

1. Внимательно рассмотрите модель электродвигателя. Найдите обмотки электромагнита, обмотки подвижной части двигателя, вал, щетки и коллектор, распределяющий ток, поступающий на щетки к разным обмоткам. Запишите предназначение перечисленных деталей.
2. Соберите установку, изображенную на рис. 193.

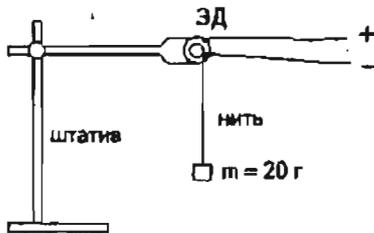


Рис. 193

Двигатель укрепите в лапке штатива так, чтобы ось его была горизонтальна, устранив перед этим перекосы вала так, чтобы он вращался свободно. С помощью винтового зажима укрепите конец нити на валу. На другом конце нити сделайте петлю для подвешивания груза. Подвесьте груз 20 г.

3. Соберите электрическую часть цепи по схеме (рис. 194).

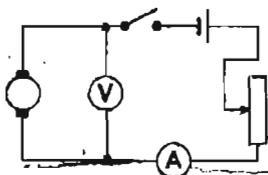


Рис. 194

4. Установите максимальное сопротивление реостата и замкните ключ.

5. Передвигая движок реостата, добейтесь того, чтобы груз поднимался за несколько секунд.
6. Запустите двигатель в этом режиме, отметив высоту  $h$ , на которую будет подниматься груз. Измерьте время  $t$  подъема, силу тока  $I$  в цепи и напряжение  $U$  на зажимах электродвигателя.
7. Рассчитайте механическую работу  $A$ , совершенную двигателем в ходе подъема груза массой  $M$  на высоту  $h$ ; механическую мощность двигателя, потребляемую электрическую мощность и электроэнергию, потребленную двигателем.
8. Рассчитайте КПД двигателя в этом режиме; измените режим подъема (увеличив скорость или изменив массу груза) и установите, отличается ли КПД двигателя в этих режимах с учетом ошибок измерений.

**2. Проверка правильности работы электрического счетчика**

Цель: составить схему электропроводки в квартире; закрепить понятие расхода электроэнергии и единиц измерения этой величины при решении практической задачи.

Оборудование: лампа накаливания мощностью 100 Вт, квартирный счетчик электроэнергии, часы с секундомером.

Ход работы

1. Квартирный счетчик представляет собой устройство, состоящее из электродвигателя, скорость вращения вала которого пропорциональна силе тока в его обмотках, и системы зубчатых колес, регистрирующих число оборотов двигателя (рис. 195).

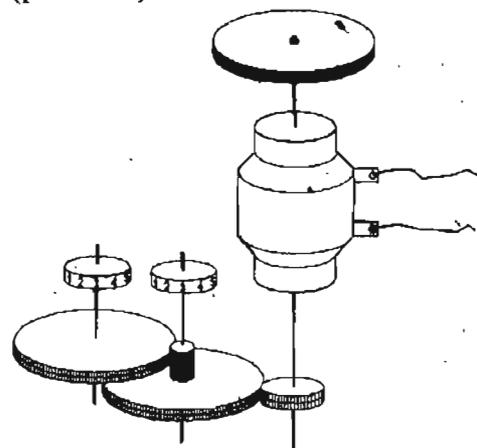


Рис. 195

2. Счетчик включают в сеть так, чтобы весь ток, протекающий через электроприборы в квартире, проходил и через обмотку счетчика. Например, ниже показана схема параллельного включения в цепь четырех ламп накаливания, электроплитки и электрического звонка, к которым последовательно подключен электросчетчик (рис. 196).

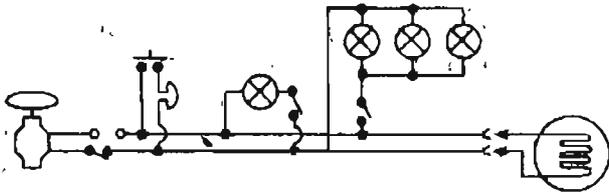


Рис. 196

3. Нарисуйте электрическую схему распределения электроэнергии, подведенной к вашей квартире, по такому образцу. Постарайтесь на схеме выделить пунктиром блоки приборов, относящиеся к разным комнатам.
4. Отключив все электроприборы, убедитесь что двигатель электросчетчика не вращается. Подключив 1, 2, 3 прибора наблюдайте, как счетчик увеличивает число оборотов.
5. Включите в квартире только одну лампу накаливания мощностью  $P = 100$  Вт (или другой известной мощности). Зарегистрируйте, за какое время  $t$  в секундах счетчик сделал 10 оборотов, проследите, произошла ли за это время смена цифр в окошке, отмечающем десятые доли киловатт-часа.
6. На каждом счетчике указано, какое число оборотов  $N_0$  соответствует 1 кВт·ч электроэнергии, прошедшему через счетчик. Запишите эту цифру.
7. Подсчитайте, какое число оборотов  $N$  сделает ваш счетчик за 10 часов при работе одной лампы в 100 Вт, ведь именно за это время она должна потребить 1 кВт·час электроэнергии:

$$N = \frac{10 \cdot 3600 \cdot 10}{t}$$

8. Сравните числа  $N$  и  $N_0$  и сделайте соответствующие выводы.

Самостоятельные  
работы

### Обучающий тест

1. Электроприбор подключен к источнику тока, и вольтметр на входных клеммах прибора показывает напряжение  $U$ . Если сила тока в приборе  $I$ , и работает он в течение времени  $t$ , то мощность потребляемая прибором равна...

 А.  $UI$ .

 Б.  $\frac{U}{I}$ .

 В.  $UIt$ .

 Г.  $\frac{UI}{t}$ .

2. В предыдущем примере выберите формулу для расчета расхода электроэнергии.

3. Если на электроприборе написано «100 Вт», это означает, что...

 А. он рассчитан на напряжение 100 В.

 Б. он выделит в окружающую среду за 1 с 100 Дж теплоты.

 В. он будет потреблять электрическую мощность 100 Вт в номинальном режиме.

 Г. он всегда будет потреблять при работе 100 Дж электроэнергии в секунду.

59

- Если электродвигатель поднимает груз и потребляет мощность 200 Вт, то за 2 с в его обмотках выделится...

 А. 200 Дж тепла.

 Б. 400 Дж тепла.

 В. 100 Дж тепла.

 Г. для ответа не хватает данных.

60

- В оптимальном режиме электродвигатель за время  $t$  потребил 100 Дж электроэнергии и совершил 25 Дж механической работы. Его КПД равен...

 А. 25%.

 Б. 75%.

 В. 100%

 Г. для ответа надо знать время  $t$ .

6. Лампа накаливания, на которой написано «100 Вт», за 1 с потребила 100 Дж электроэнергии. Это означает, что ее КПД...

 А. 100%.

 Б. >100%.

 В. <100%.

 Г. бессмысленно говорить о КПД лампы накаливания.

7. Рефлектор для обогрева комнаты потребил 1 кВт·ч электроэнергии и отдал при этом комнате 3600 кДж теплоты. Это означает, что его КПД...

- А. 100%.
- Б. >100%.
- В. <100%.
- Г. бессмысленно говорить о КПД рефлектора.

8. Кипятильник мощностью 1000 Вт, работая в номинальном режиме, за 300 с передал 100 кДж теплоты воде в банке. Его КПД равен...

- А. 1.
- Б.  $\frac{1}{2}$ .
- В.  $\frac{1}{3}$ .
- Г.  $\frac{1}{10}$ .

9. Электромагнит поднимает груз в 100 г. Если число витков в нем увеличить в 2 раза, то при той же силе тока в обмотке он сможет поднять груз...

- А. 100 г.
- Б. 200 г.
- В. 400 г.
- Г. 50 г.

10. С увеличением силы тока через обмотку электромагнита при неизменном числе витков в нем, масса железной болванки, которую он может удержать на весу...

- А. увеличивается.
- Б. уменьшается.
- В. не изменяется.
- Г. сначала, растет затем падает.

11. В записывающей головке дисководов компьютера и на жестком диске использованы ферромагнитные материалы. В каком случае использован жесткий ферромагнетик, в каком — мягкий ферромагнетик?

- А. В первом — жесткий, во втором — мягкий.
- Б. В первом — мягкий, во втором — жесткий.
- В. В обоих — мягкий.
- Г. В обоих — жесткий.

12. На рис. 197 приведен график зависимости от времени напряжения, показываемого вольтметром.

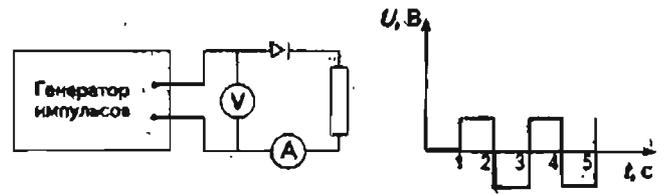


Рис. 197

Какой из графиков (рис. 198) правильно отражает зависимость показаний амперметра в цепи?

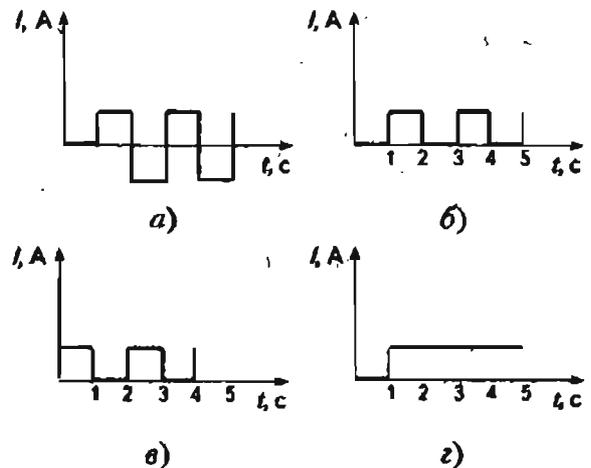
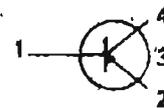


Рис. 198

13. Какой цифрой обозначен на схеме эмиттер транзистора?



- А. 1.
- Б. 2.
- В. 3.
- Г. 4.

14. Три бытовых электроприбора рассчитаны на напряжение 220 В. Мощность каждого из них 800 Вт. Изоляция подводящих проводов плавится при силе тока 5 А. В комнате имеется 3 розетки и тройник. Какое подключение допустимо?

- А. Только к трем различным розеткам.
- Б. Все три прибора к одной розетке через тройник.
- В. Два прибора к одной розетке через тройник, а один — ко второй.
- Г. Ни одно из предложенных.

*Тренировки по  
решению задач***Уровень А**

1. Электродвигатель выполняет за час 360 кДж полезной работы и потребляет 0,4 кВт·ч электроэнергии. Каков его КПД? Какое количество теплоты выделилось в его обмотках?
2. На корпусе электродвигателя указываются номинальные значения напряжения, силы тока и развиваемая при этом полезная (механическая) мощность. Каков КПД двигателя в номинальном режиме, если на нем указано: 380 В, 5 А и 1 кВт? За какое время он поднимет груз массой 1 т на высоту 10 м в этом режиме? Сколько электроэнергии при этом израсходует? Ускорение свободного падения считать равным  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

**Уровень Б**

3. Трамвай массой 22,5 т движется по горизонтальному участку пути со скоростью  $36 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ . Коэффициент трения равен 0,01. Какую силу тока показывает амперметр на щитке водителя, если напряжение на линии 500 В, а КПД двигателей 50%?
4. Каково сопротивление спирали нагревателя в электрочайнике, если при напряжении в сети 220 В он нагревает 1 кг воды на 80 °С за 5 мин? КПД чайника 70%. Какова при этом сила тока в спирали?
5. Простейшее зарядное устройство представляет собой диод, последовательно соединенный с резистором. При зарядке клеммы аккумулятора подключаются к концам резистора. Нарисуйте схему такого устройства и график зависимости силы тока в резисторе с сопротивлением 100 Ом от времени, если на вход устройства подается напряжение, график зависимости которого от времени — синусоида с периодом 0,02 с и амплитудой 10 В. Каков КПД этого устройства, если

при расходе электроэнергии 0,1 кВт·ч удалось запастись в аккумуляторе 36 кДж электроэнергии?

*Контрольная  
работа***Уровень А (рассчитана на 45 мин)**

1. Двигатель потребляет 50 кВт·ч электроэнергии. Его КПД при этом 10%. Какое количество теплоты выделится за это время в пространство?
2. В комнате включено 5 ламп по 100 Вт при напряжении на каждой лампе 220 В. Какова сила тока в подводящих электроэнергию проводах? Сколько электроэнергии будет израсходовано за 0,5 ч горения ламп?
3. Опишите устройство и возможные области применения диода.

**Уровень Б (рассчитана на 45 мин)**

1. Подъемный кран поднимает за 60 с груз в 2 тонны на высоту 15 м. Какова сила тока в обмотке электродвигателя крана, если он работает от сети с напряжением 380 В и при этом его КПД 30%?
2. СВЧ печь при потребляемой мощности 1000 Вт может вскипятить стакан воды (200 г) за 2 мин. Начальная температура воды 20 °С. Каков КПД печи в этом процессе?
3. На вал генератора переменного тока намотали нить длиной 1 м, привязали к ней гирию в 1 кг, а к выходным клеммам генератора подключили последовательно полупроводниковый диод и конденсатор. Опишите преобразования энергии в таком устройстве. Каков КПД такого устройства (отношение энергии, запасенной в конденсаторе, к потенциальной энергии гири), если конденсатор емкостью 5 мкФ зарядился до напряжения 4 В? Куда был израсходован остальной запас энергии?

# *Электромагнитные колебания и волны.*

## *Оптика*

- ◆ Электромагнитные колебания
- ◆ Электромагнитные волны
- ◆ Свет как электромагнитная волна
- ◆ Обобщения электродинамики
- ◆ Основные положения специальной теории относительности



# Электромагнитные колебания

## Изучив эту тему,

- вы узнаете, что является причиной возникновения электромагнитных колебаний и переменного электрического тока;
- поймете, как можно использовать свойства электромагнитных полей;
- научитесь рассчитывать основные параметры цепей переменного тока

## 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И СРЕДСТВА ИХ ОПИСАНИЯ

*Конспект.  
Таблицы. Схемы*

Ранее рассматривалось явление механических колебаний, т. е. периодическое движение механической системы. **Периодическим** называют такое движение колебательной системы, которое повторяется через определенное время. В качестве системы может быть одно тело, подвешенное на нити. При колебательном движении, например математического маятника, периодически изменяются координаты материальной точки, ее скорость, кинетическая энергия и другие характеристики.

## Основные понятия:

Период колебаний • Частота • Амплитуда • Колебательный контур • Фаза колебания • Спектр • Автоколебания • Переменный ток • Активное сопротивление • Действующее значение тока • Индуктивное и емкостное сопротивление • Резонанс • Генератор электрического тока • Трансформатор

наты материальной точки, ее скорость, кинетическая энергия и другие характеристики.

Но колебательное движение существует и в других системах – электрических цепях. *Причиной всех электрических колебаний является переменное электромагнитное поле.* Это такое поле, характеристики которого  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  периодически изменяются. Обратимся к изучению явлений, к которым приводит существование переменного электромагнитного поля.

Физические явления всегда происходят с какими-либо физическими системами и выражаются в изменении состояния этих систем. В каких системах происходят электромагнитные колебания? Каковы основные характеристики таких колебаний?

**Колебательный контур**

Простейшая физическая система, в которой могут происходить электромагнитные колебания, состоит из последовательно соединенных конденсатора и катушки индуктивности (рис. 1). Если активное сопротивление такой цепи равно нулю, то систему называют идеальным колебательным контуром.

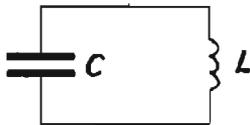


Рис. 1

При каких начальных условиях в такой цепи возможны электрические колебания? Самый простой вариант — зарядить конденсатор. Рассмотрим, какие явления после этого будут происходить.

Итак, конденсатор  $C$  заряжен от внешнего источника постоянного тока и замкнут на катушку индуктивности  $L$ . Раз конденсатор замкнут, то он начнет разряжаться. По катушке потечет электрический ток. Но разрядка конденсатора и, соответственно, возрастание электрического тока не происходят мгновенно. При возрастании тока в катушке около нее возникает переменное магнитное поле, которое, в свою очередь, порождает в катушке вихревое электрическое поле. Это поле сначала направлено против поля конденсатора и таким образом препятствует мгновенному возрастанию электрического тока. Максимального значения ток достигает тогда, когда конденсатор полностью разрядился (рис. 2, в). Естественно, далее ток уменьшается, но по правилу Ленца магнитное поле катушки уже создает такое вихревое электрическое поле, которое поддерживает ток в катушке (рис. 2, г). В итоге, конденсатор перезарядается (рис. 2, д). Далее процесс симметрично идет в обратном направлении.

**Теоретическое описание процессов в колебательном контуре**

Прежде всего рассмотрим основные физические величины.

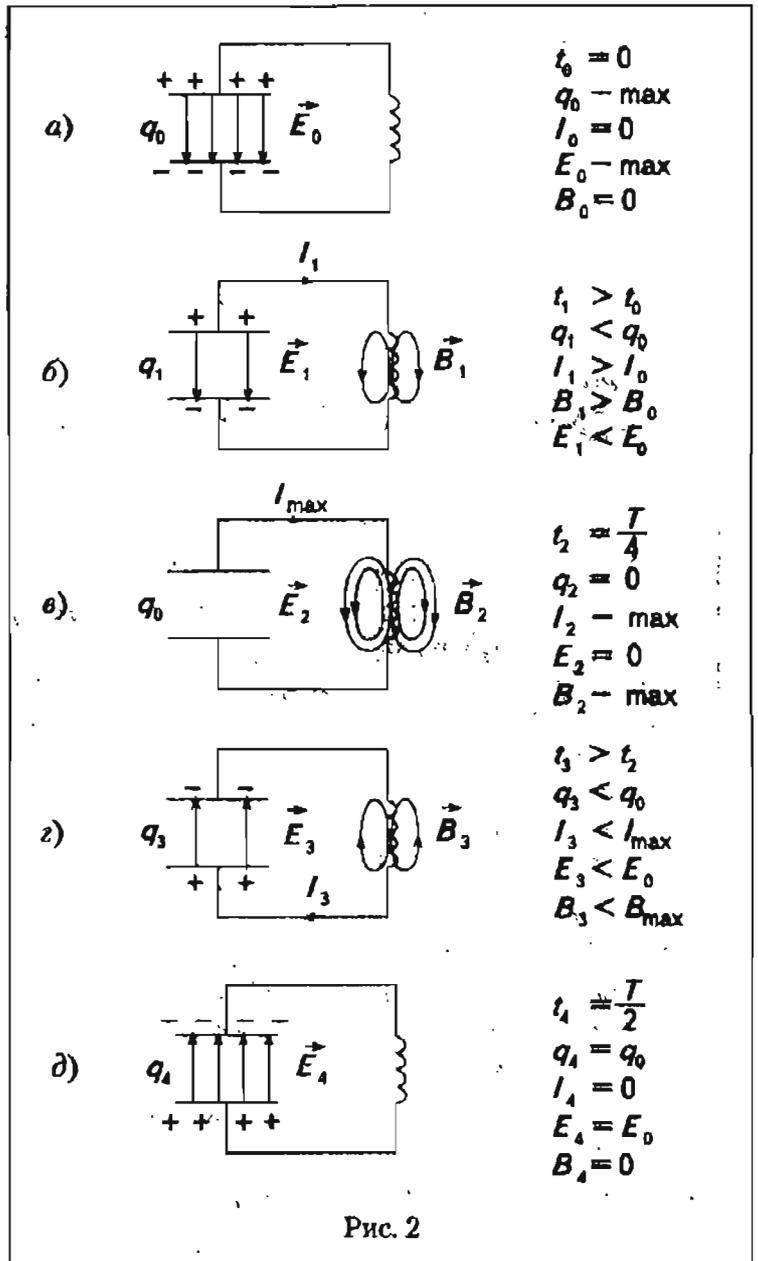


Рис. 2

**Период  $T$**  — это время совершения одного полного колебания. За это время колебательная система возвращается в свое первоначальное состояние. Значит, на рис. 2 изображен процесс, протекающий в течение половины периода. Время  $T$  измеряется в секундах.

**Частота  $\nu$  (или  $\omega = 2\pi\nu$ )** — это число колебаний за одну секунду. Единицей измерения частоты является 1 герц (Гц); это такая частота колебаний, при которой совершается одно колебание в секунду. На практике электромагнитные колебания совершаются с частотой в тысячи и миллионы герц.

**Амплитуда  $A$**  — это максимальное значение (по модулю) изменяющейся физической величины. Она измеряется в единицах соответствующей величины.

Какие же физические величины изменяются в ходе процессов, происходящих в колебательном контуре (рис. 2)? Это заряд  $q$  конденсатора, сила тока  $i$  в цепи, напряженность электрического поля  $E$ , магнитная индукция  $B$  поля катушки, энергия электрического поля конденсатора  $W_e$  и энергия магнитного поля катушки  $W_m$ . Таким образом, в колебательном контуре одновременно происходит несколько колебательных процессов различных физических величин. Все эти колебания, во-первых, взаимосвязаны, во-вторых, обусловлены изменениями электромагнитного поля.

После введения основных физических величин, обратимся к задаче получения основного закона колебательных процессов в контуре.

**Колебательный контур** — это замкнутая физическая система. В таких системах полная энергия сохраняется. В произвольный момент времени закон сохранения энергии записывается так:

$$\frac{Cu^2}{2} + \frac{Li^2}{2} = \text{const.}$$

Из закона сохранения энергии можно получить основное динамическое уравнение колебаний в контуре. Для этого перепишем уравнение в другой форме и возьмём производные по времени от левой и правой частей.

$$\left(\frac{q^2}{2C}\right)' + \left(\frac{Li^2}{2}\right)' = 0.$$

Производная постоянной величины равна нулю. С учетом того, что производная от величины заряда  $q$  дает силу тока  $i$ , получаем:

$$\frac{L}{2} 2ii' = -\frac{1}{2C} qq'.$$

После преобразований имеем уравнение:

$$q'' = -\frac{1}{LC} q.$$

Полученная формула аналогична по форме уравнению колебаний пружинного маятника:

$$x'' = -\frac{k}{m} x.$$

Очевидно, что уравнение колебаний координаты  $x$  пружинного маятника и уравнение колебаний величины заряда  $q$  на конденсаторе имеют одинаковый вид.

Приведенные уравнения в физике (и математике) называются дифференциальными уравнениями. Существуют особые правила их решения. Но обычно эти правила изучают уже в высших учебных заведениях. Главное, решение дифференциального уравнения свободных электромагнитных колебаний в контуре приводит к такому выражению для заряда:

$$q = q_m \cos \omega_0 t, \text{ где } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Колебания заряда на конденсаторе, которые происходят по закону косинуса (или синуса), называются гармоническими колебаниями. Величина  $\omega_0 = 2\pi\nu$  называется собственной круговой (или циклической) частотой.

По аналогичному закону происходят колебания силы тока в контуре, напряжения на конденсаторе и других физических величин:

$$i = I_m \cos \left( \omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right),$$

$$u = U_m \cos \omega_0 t.$$

Из формулы  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  можно получить выражение для периода колебаний:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}$$

Полученную формулу называют **формулой Томсона** в честь английского физика Уильяма Томсона (1824—1907), который получил ее в 1853 г.

### Графическое описание процессов в колебательном контуре

Графики изменения физических величин с течением времени удобны для описания периодических процессов. На рис. 3 приведены графики изменения заряда на конденсаторе и силы тока в колебательном контуре.

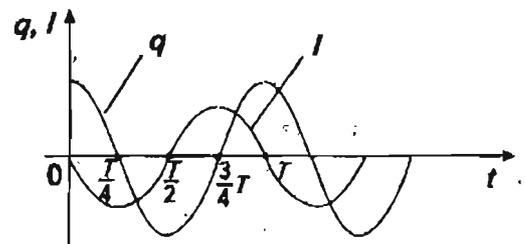


Рис. 3

В начальный момент времени заряд на конденсаторе максимальный, сила тока в цепи равна нулю. Если колебательный контур — идеальный, то электромагнитные колебания продолжаются бесконечно долго и, соответственно, графики бесконечно продлеваются вправо по оси.

График изменения заряда соответствует уравнению  $q = q_m \sin\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right)$ . Выражение  $\omega_0 t + \frac{\pi}{2}$  называют фазой колебания, а угол  $\frac{\pi}{2}$  — начальной фазой. В начальный момент времени фаза колебаний как раз и равна начальной фазе. Значение фазы колебаний однозначно определяет значение физической величины (например, заряда, силы тока и т. п.) в заданный момент времени, так как амплитудное значение величины — постоянно. Вывод: фаза колебания однозначно определяет состояние колебательной системы.

Графики, изображенные на рис. 3, отличаются при равной амплитуде (что всегда возможно достичь за счет выбора единиц измерения величин) только фазой колебания. Сдвиг фаз составляет  $\frac{\pi}{2}$ , причем сила тока отстает по фазе от заряда.

Для определения разности фаз нужно выразить формулы колебаний одной тригонометрической функцией.

Иногда важно сравнить колебания лишь по частоте и амплитуде. В этом случае графики представляют собой прямые линии (рис. 4). Такие графики называют спектральным изображением. На рис. 4 изображены три колебания разной частоты и амплитуды. Такой способ изображения важен тогда, когда сложное колебание представляют в виде нескольких гармонических колебаний. Такое разложение называют спектром.

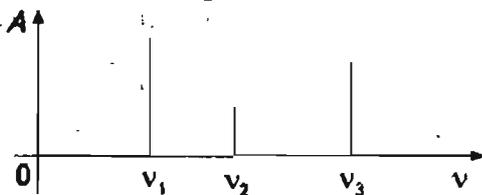


Рис. 4

### Экспериментальное изучение процессов в колебательном контуре

Теоретическое описание колебаний имеет ряд преимуществ: по начальным условиям с помощью известных формул (закономерностей) можно рассчи-

тать нужные параметры. Но обычно первичное изучение процесса, накопление сведений о нем осуществляют с помощью эксперимента.

С помощью установки (рис. 5) можно экспериментально исследовать некоторые свойства колебаний в колебательном контуре.

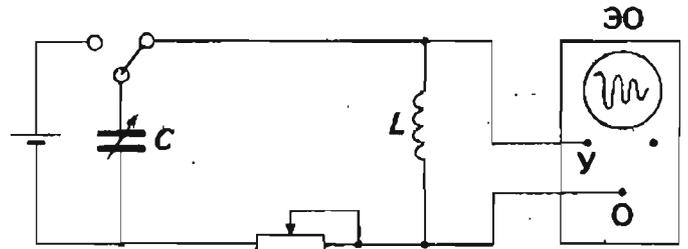


Рис. 5

#### Опыт 1

Выведем влево ползунок реостата, т. е. выключим его сопротивление. Зарядим конденсатор  $C$  и замкнем колебательный контур. На экране электронного осциллографа ЭО будет наблюдаться график изменения силы тока в контуре. На этом графике колебаний наблюдается уменьшение амплитуды. Вывод: свободные электромагнитные колебания в контуре затухают. Строго говоря, затухающие колебания нельзя назвать гармоническими. Наконец, строго говоря, такие колебания вообще нельзя назвать колебаниями. Но при небольшом затухании (например, когда совершаются сотни и тысячи колебаний) таким ограничением при изучении колебаний пренебрегают.

Причина затухания свободных колебаний — существование активного сопротивления проводников катушки. Часть энергии электромагнитного поля при каждом колебании превращается во внутреннюю энергию.

#### Опыт 2

Как будут изменяться колебания, если увеличить активное сопротивление колебательного контура? Это можно выяснить с помощью реостата. На экране осциллографа колебания будут затухать быстрее; при очень большом сопротивлении их просто нет.

#### Опыт 3

Какие изменения в колебательных процессах произойдут, если увеличить емкость конденсатора? С помощью формулы Томсона можно теоретически предсказать один из результатов опыта. Он состоит в увеличении периода колебаний.

Но на осциллограмме мы увидим, что и амплитуда колебаний тоже увеличивается. Теоретически это можно объяснить так:  $I_m = \frac{q_m}{\sqrt{LC}}$ , а  $q_m = CU$ . В итоге:

$I_m = \frac{\sqrt{C}}{\sqrt{L}} U$ . То есть при постоянных значениях индуктивности  $L$  и разности потенциалов  $U$  амплитудное значение силы тока зависит от электроемкости. Что и подтверждает опыт.

Какие изменения в колебательных процессах происходят при изменении индуктивности катушки? Как можно изменить индуктивность? Каким способом можно получить высокочастотные колебания? На эти вопросы во многих случаях проще и нагляднее получить ответ с помощью эксперимента, чем теории. При постановке опытов можно открыть и что-то новое.

### Автоколебания. Генератор незатухающих колебаний

В реальном колебательном контуре электромагнитные колебания всегда (и достаточно быстро) затухают. Во-первых, потому что всегда есть активное сопротивление и постоянно идет превращение части энергии электромагнитного поля во внутреннюю энергию тела. А это безвозвратная потеря энергии. Во-вторых, обычно в колебательном контуре за секунду происходит много колебаний, и поэтому запасенная энергия быстро теряется. Но на практике важно иметь постоянные колебания. Как быть?

Для получения продолжительных колебаний колебательную систему расширяют, добавляя в неё источник тока (источник энергии) и специальный «клапан» (рис. 6).

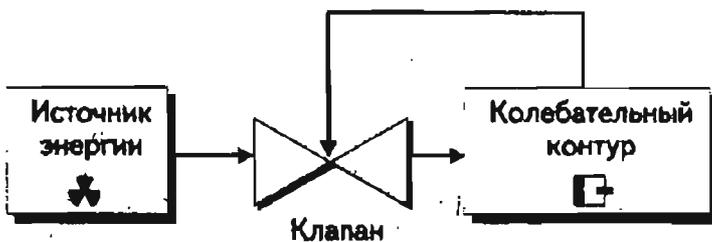


Рис. 6

«Клапан» нужен для того, чтобы быстро и вовремя добавлять энергию в колебательный контур. Внешнее управление для этого не годится, например, не получится включать и выключать ключ

(рис. 5). Поэтому используют внутреннее управление: сам колебательный контур периодически включает и выключает клапан. Такой механизм управления называют **положительной обратной связью**.

В качестве клапана используют так называемый генератор на транзисторе (рис. 7). Катушка связи  $L_{св}$  включена так, что при возрастании тока в катушке  $L$ , а значит, и в катушке  $L_{св}$ , на базе транзистора оказывается потенциал, отпирающий транзистор. При этом ток от батареи поддерживает ток в колебательном контуре, т. е. в контур поступает энергия. Так продолжается половину периода колебаний. Во вторую половину периода транзистор заперт.

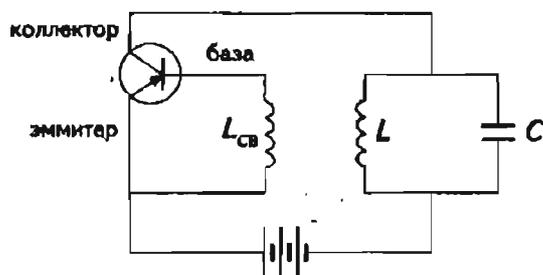


Рис. 7

Колебательная система, которая способна поддерживать свои колебания с постоянной амплитудой, называется **автоколебательной системой**. Можно выделить следующие основные свойства автоколебаний:

- колебания существуют относительно долго, пока есть энергия в источнике тока;
- частота автоколебаний равна частоте собственных колебаний контура;
- амплитуда электромагнитных колебаний в контуре зависит от напряжения источника тока, активного сопротивления контура, вида обратной связи.

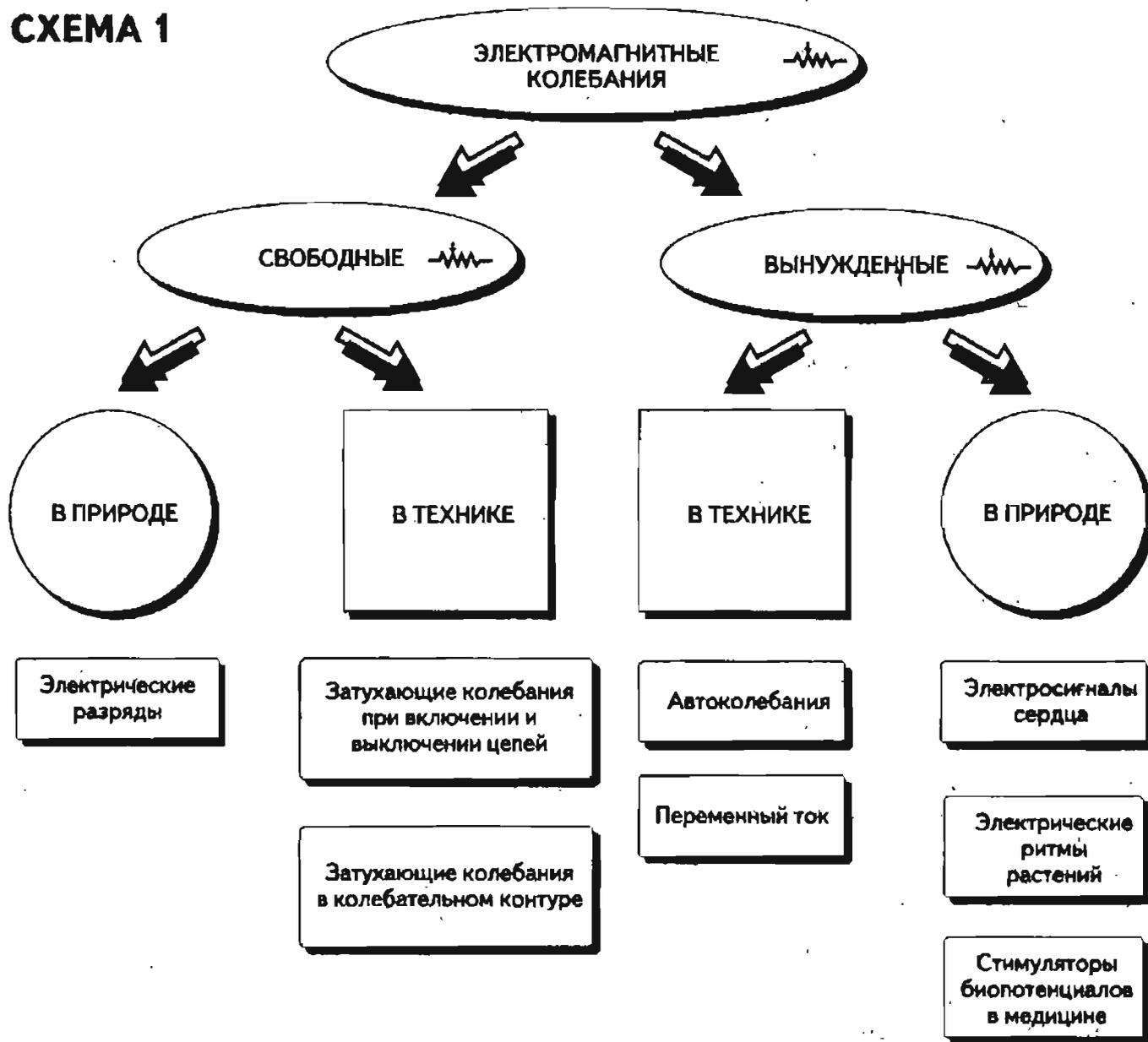
Автоколебания, в отличие от свободных колебаний являются вынужденными колебаниями.

### Систематизация изученных знаний

Прежде всего, следует разобраться, какие физические явления мы изучили. На схеме 1 показан мир электромагнитных колебаний. Они бывают самой разной частоты и амплитуды, времени существования.

Незатухающие электромагнитные колебания в колебательном контуре — идеальное явление. Таких

СХЕМА 1



колебаний в природе не бывает, но на этом идеальном примере лучше всего рассмотреть все существенные свойства электромагнитных колебаний, сравнить одни колебания с другими. На схеме 2 систематизированы знания о свободных колебаниях.

*Самостоятельная работа*

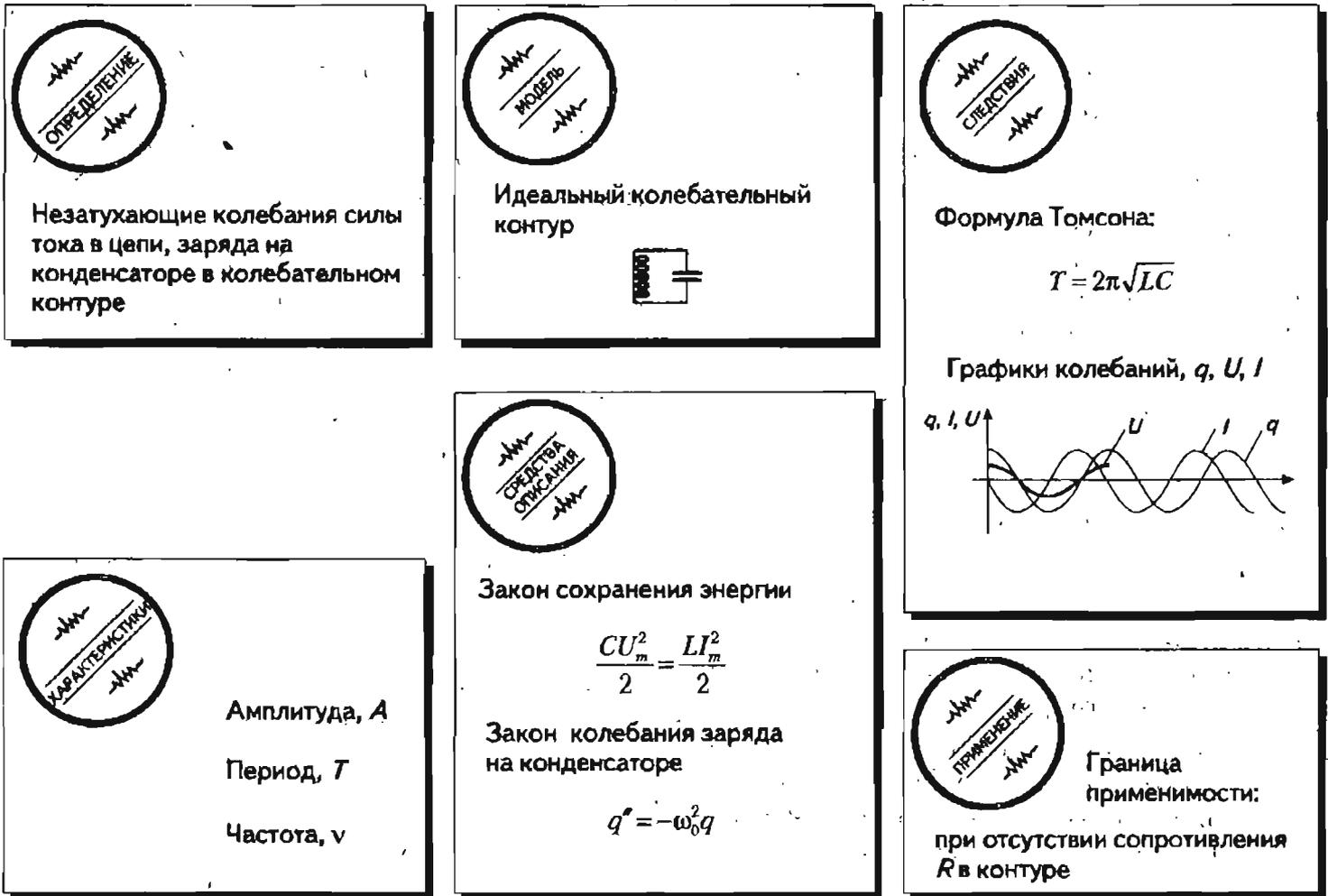
**Ответить на вопросы**

Можно ли считать свободные электромагнитные колебания в идеальном колебательном контуре явлением идеальным (т. е. несуществующим в при-

роде)? Как теоретически (экспериментально) доказать, что свободные колебания в реальном контуре всегда затухающие? Перечислите, какие физические явления будут происходить в колебательном контуре, если зарядить конденсатор? Какие характеристики свободных электромагнитных колебаний вам известны? Какова причина существования свободных электромагнитных колебаний в контуре? Какими законами описывается процесс свободных электромагнитных колебаний в колебательном контуре? Является ли замкнутой системой колебательный контур в автоколебательной системе? Сохраняется ли в нем энергия? Что называют фазой колебаний? Как ее определить? Чем

## СХЕМА 2

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ



отличаются колебания разных величин в одном колебательном контуре? Одинакова ли частота этих колебаний? Одинаковы ли колебания разных величин по фазе? От чего зависит фаза колебания? Всегда ли свободные электромагнитные колебания гармонические?

## Пример решения задачи

Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью  $C = 400$  пФ и катушки индуктивностью  $L = 10$  мГн. Найти амплитуду колебаний силы тока, если амплитуда колебаний напряжения на конденсаторе 500 В.

## Выделение явления

По условиям задачи имеют место свободные гармонические электромагнитные колебания в колебательном контуре. Вид уравнения колебания для силы тока следующий:  $i = I \cos \omega_0 t$ . Определить амплитуду  $I$ .

## Описание явления

Вспомним, что колебательный контур — замкнутая физическая система. Для нее выполняется закон сохранения энергии. Это важное и удобное средство описания нашего явления. Запишем уравнение закона сохранения энергии:

$$\frac{LI^2}{2} = \frac{CU^2}{2}$$

Анализ уравнения убеждает в том, что, во-первых, искомая величина входит в уравнение, во-вторых, все остальные величины известны. Выразим нужную величину:

$$I = U \sqrt{\frac{C}{L}}$$

Остается выполнить расчет. В итоге  $I = 0,1$  А.

Вопросы для обсуждения

Точное или приближенное значение силы тока мы получили? Как это доказать?

**Подсказка:** подумайте, точные или приближенные значения имеют данные емкости, индуктивности, напряжения. Зависит ли амплитудное значение силы тока от емкости и индуктивности?

*Самостоятельная работа*

Выполняется в классе, время — 20 мин.

### Вариант 1

- Объяснить, чем отличаются электромагнитные колебания в идеальных и одинаковых колебательных контурах, если конденсаторы были заряжены от источников тока с разными ЭДС? Ответ пояснить графиком.
- Определить период электромагнитных колебаний в контуре с катушкой индуктивности  $2 \cdot 10^{-2}$  Гн и конденсатором известной емкости, выданным учителем для выполнения работы.

## 2. ПЕРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

*Конспект. Таблицы. Станки*

При открытии и изучении физических явлений ученые исследуют возможности их использования для нужд людей. В частности, справедлив вопрос: нельзя ли получить и использовать постоянные во времени электромагнитные колебания? Очевидно, что такие колебания не могут быть свободными.

### Вариант 2

- Чем могут отличаться электромагнитные колебания в одинаковых колебательных контурах, имеющих разные активные сопротивления? Ответ пояснить графиками.
- Сколько колебаний произойдет в колебательном контуре за две секунды, если емкость конденсатора 800 пФ, а индуктивность катушки 2 мкГн?

*Практикум по решению задач*

### Задачи повышенной сложности

По любому изучаемому физическому объекту или явлению всегда можно встретить задачу повышенной сложности (и даже неожиданную, т. е. трудную). Но отношение к ним должно быть обычное:

- выделить происходящие явления путем анализа; обратить внимание на особенности явлений;
- выявить известные характеристики, т. е. физические величины, и применить известные законы для описания явлений.

Приведем примеры таких задач.

- Определить силу тока в катушке идеального колебательного контура, если максимальный ток в контуре равен  $I_0$ , а в этот момент напряжение на конденсаторе равно  $U$ . Индуктивность катушки и емкость конденсатора известны.
- Как изменятся электромагнитные колебания в идеальном контуре, если пластины плоского конденсатора раздвинуть, а расстояние между витками катушки увеличить?

Последние всегда затухают. Какие это колебания и как их получить?

### Получение переменного электрического тока

При действии в замкнутой цепи переменной ЭДС в цепи возникнут колебания силы тока и напряжения — переменный электрический ток. Другими

словами **переменный электрический ток** — это вынужденные колебания силы тока и напряжения в электрической цепи под действием переменной ЭДС.

Источником переменной ЭДС может быть **генератор переменного тока**. Рассмотрим устройство и принцип его работы.

Пусть в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  вращается (с помощью внешнего механического привода) проволочная рамка (рис. 8). Ось вращения расположена перпендикулярно линиям магнитной индукции. Что же происходит в рамке?

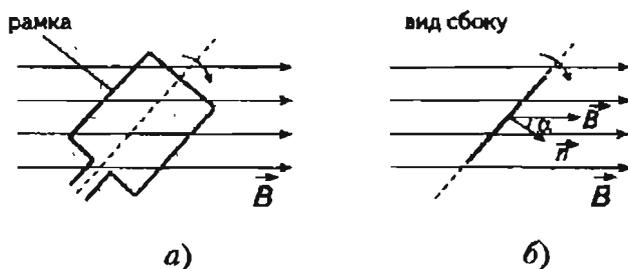


Рис. 8

При вращении рамки магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий контур рамки, изменяется:

$$\Phi = \Phi_0 \cos \alpha = BS \cos \omega t.$$

По закону электромагнитной индукции в такой рамке возникает ЭДС индукции. По закону Фарадея она равна:

$$\mathcal{E} = -\dot{\Phi} = BS\omega \sin \omega t = \mathcal{E}_0 \sin \omega t.$$

Итак, на концах проволочной рамки возникает ЭДС, которая меняется по гармоническому закону. Если концы рамки замкнуть на какой-либо участок электрической цепи, то под действием внешней периодической ЭДС в цепи будут происходить гармонические электромагнитные колебания. Их причина — переменное электрическое поле, созданное внешним источником тока с переменной ЭДС. На рис. 9 изображена действующая модель генератора переменного тока.

### Электрический ток на участке цепи с резистором

Сопротивление элемента электрической цепи переменному электрическому току, при котором происходит превращение электрической энергии во

Модель генератора

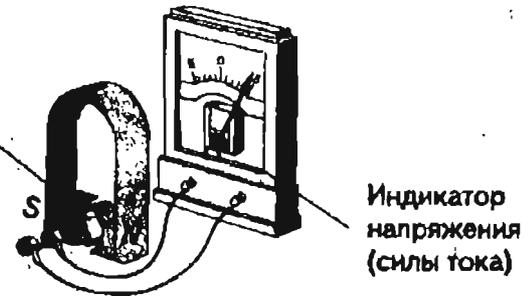


Рис. 9

внутреннюю, называют **активным сопротивлением** (резистором). Предположим, что на участок цепи с резистором подается переменное напряжение  $u = U_m \cos \omega t$  (рис. 10). В результате на этом участке цепи возникает электрическое поле, напряженность которого изменяется по такому же закону. При наличии свободных зарядов на участке цепи с резистором возникает переменный электрический ток  $i = I_m \cos \omega t$ .

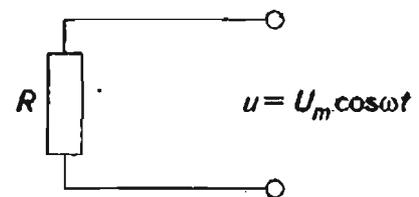


Рис. 10

Частота и фаза колебаний силы тока совпадают с частотой и фазой колебаний напряжения. Экспериментально это можно показать с помощью осциллографа (рис. 11).

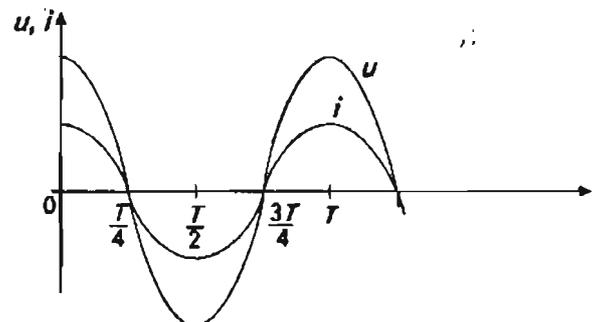


Рис. 11

На графиках максимумы и минимумы колебаний напряжения и силы тока совпадают по времени. Это и понятно: если напряжение нуль, т. е. электрическое поле отсутствует, то и сила тока тоже равна нулю. Для переменного электрического тока на

резисторе выполняется закон Ома для участка цепи:

$$I_m = \frac{U_m}{R}.$$

Обратимся к энергетическому описанию переменного электрического тока на участке цепи с резистором. Выражение для мгновенной мощности таково:

$$p = iu = I_m U_m \cos^2 \omega t.$$

График изменения мощности со временем показан на рис. 12. Выделение энергии на резисторе с течением времени меняется от максимального до минимального. Но практическое значение имеет средняя мощность, потребляемая резистором за период.

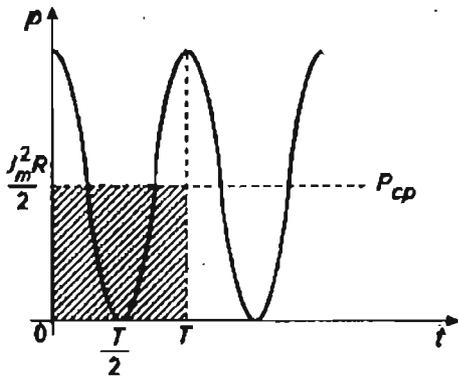


Рис. 12

Преобразуем формулу для мгновенной мощности:

$$p = I_m U_m \cos^2 \omega t = I_m U_m \frac{1 + \cos 2\omega t}{2} = \frac{I_m U_m}{2} + \frac{I_m U_m}{2} \cos 2\omega t.$$

Среднее значение косинуса двойного угла за период равно нулю, поэтому для средней мощности за период получаем:

$$p = \frac{I_m U_m}{2}.$$

С учетом закона Ома:

$$p = \frac{I_m^2 R}{2}.$$

Получается, что *средняя за период мощность переменного тока — величина постоянная*. Энергия, поступающая от источника переменного тока и выделяемая на резисторе, равна за время  $t$  (например, за  $t = T$ ) площади заштрихованного прямоугольника (рис. 12).

Если ввести новую физическую величину — действующее значение силы тока — по формуле  $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ , то формула для мощности переменного тока будет совпадать с формулой для мощности постоянного тока:

$$p = P = I^2 R.$$

По аналогии вводят понятие о действующем значении переменного напряжения:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

Таким образом, переменный электрический ток с данными действующими значениями силы тока и напряжения выделит за одно и то же время такое же количество энергии, что и постоянный ток таких же параметров. Для действующих значений силы тока и напряжения выполняется закон Ома.

### Электрический ток на участке с индуктивностью

Рассмотрим, как ведет себя переменный электрический ток на участке с катушкой индуктивности. Для простоты рассмотрения предположим, что активное сопротивление отсутствует. На участок подается переменное напряжение (рис. 13). На основе известных знаний построим сначала теорию происходящего процесса.

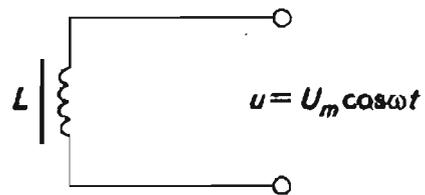


Рис. 13

Итак, в катушке возникает переменное электрическое поле и идет переменный электрический ток, который создает около катушки переменное магнитное поле. Последнее по закону электромагнитной индукции создает в катушке индуцированное электрическое поле. Оно, по правилу Ленца, всегда препятствует изменению силы тока в цепи. При условии равенства нулю активного сопротивления, внешнее электрическое поле должно компенсироваться индуцированным электрическим полем в каждый момент времени. Почему? Да в противном случае даже небольшое напряжение  $U$  по закону

Она приводило бы к большим значениям силы тока  $I$ . Значит,  $u = -e$ , но:

$$u = U_m \cos \omega t, \text{ а } e = -Li', \text{ т. е.}$$

$$U_m \cos \omega t = -Li'.$$

По какому же закону изменяется сила тока  $i$  на участке цепи с индуктивностью? Для ответа на этот вопрос следует решить полученное уравнение. Предположим, что сила тока изменяется по закону  $i = I_m \sin \omega t$ . Возьмем от этого выражения производную по времени и подставим в уравнение. Получим:

$$U_m \cos \omega t = LI_m \omega \cos \omega t.$$

Отсюда получаем:  $I_m = \frac{U_m}{L\omega}$ .

В итоге при таком значении амплитуды силы тока мы верно определили уравнение колебаний силы тока в цепи с индуктивностью. При сравнении выражений  $I_m = \frac{U_m}{L\omega}$  и  $I_m = \frac{U_m}{R}$  получаем, что  $R = L\omega$ .

Величина  $L\omega$ , которая играет ту же роль, что и сопротивление  $R$ , получила название **индуктивного сопротивления**.

Повторим полученные результаты

1. Напряжение  $u$  на участке цепи с индуктивностью  $L$  и сила тока  $i$  не совпадают по фазе, но колеблются с одинаковой частотой (рис. 14):

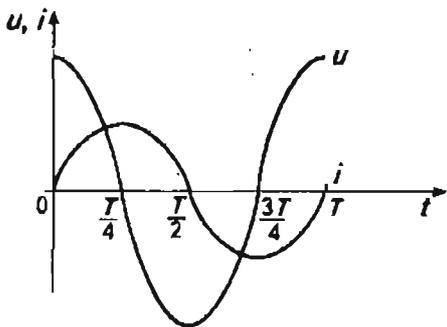


Рис. 14

2. Участок цепи с индуктивностью  $L$  оказывает сопротивление переменному электрическому току. Причем, чем больше частота тока, тем больше сопротивление. Таким образом, проводник с индуктивностью  $L$  действует по-разному на токи разной частоты. Этот теоретический вы-

вод легко подтверждается экспериментально (рис. 15). Школьный звуковой генератор является источником тока с небольшой ЭДС, но регулируемой в большом диапазоне частот. Если увеличивать частоту, то показания амперметра (гальванометра) уменьшаются.

Генератор звуковой частоты

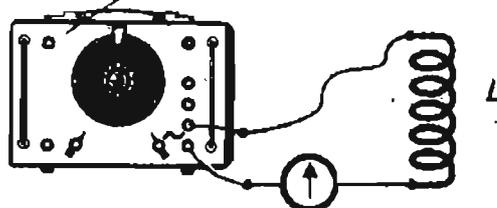


Рис. 15

Вясним, как изменяется мощность в цепи с индуктивностью. Для этого получим формулу для мгновенной мощности:

$$p = iu = I_m U_m \cos \omega t \cdot \sin \omega t = \frac{I_m U_m}{2} \sin 2\omega t.$$

На рис. 16 показан график мощности. В первую половину периода энергия положительна, т. е. она поступает в цепь от внешнего источника тока. Во вторую половину периода энергия отрицательна, т. е. цепь отдает энергию, запасенную в форме энергии магнитного поля катушки. В среднем за период мощность (и энергия) равна нулю. Индуктивность «не потребляет» электрической энергии, и в этом состоит особенность индуктивного сопротивления.

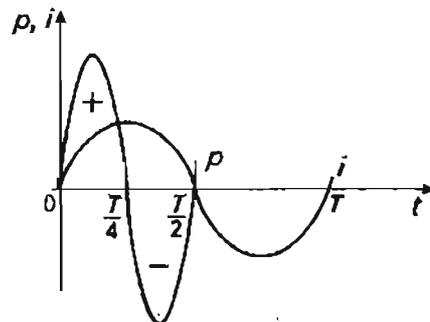


Рис. 16

### Переменный электрический ток на участке с конденсатором

Эксперимент убедительно доказывает, что лампочка в цепи переменного тока с конденсатором горит

а в цепи постоянного тока — нет. Как это теоретически объяснить?

Конденсатор в цепи постоянного тока равносителен разрыву цепи. Поэтому лампочка и не горит. Рассмотрим подробнее цепь переменного тока с конденсатором (рис. 17).

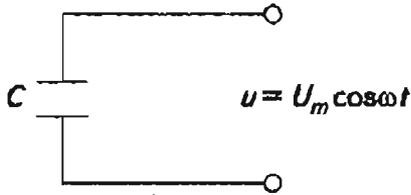


Рис. 17

Предположим, на участок цепи подается переменное напряжение  $u = U_m \cos \omega t$ . Как ведет себя сила тока? Напряжение на конденсаторе  $u$  будет равно подаваемому напряжению. Следовательно:

$$\frac{q}{C} = U_m \cos \omega t \text{ или } q = U_m C \cdot \cos \omega t.$$

Мгновенное значение силы тока определяется как производная от заряда по времени, т. е.

$$i = q' = -U_m C \omega \cdot \sin \omega t = U_m C \omega \cdot \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) = I_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

На рис. 18 изображены графики изменения напряжения и силы тока. Получается, что сила тока на участке цепи с конденсатором опережает напряжение на четверть периода. Но частота колебаний этих физических величин одинакова. Отставание напряжения на конденсаторе по фазе от силы тока понятно из характера процесса: конденсатор заряжается постепенно, и при максимальном напряжении, равном  $U_m$ , ток прекращается, а, значит, сила тока равна нулю.

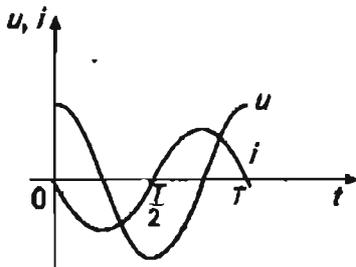


Рис. 18

Из формул, приведенных выше, получается, что  $I_m = U_m C \omega$ , значит, с учетом формы записи закона Ома можно ввести понятие емкостного сопротив-

ления  $R_c = \frac{1}{\omega C}$ . Если вместо обычного конденсатора взять конденсатор переменной емкости и включить последовательно с ним лампочку, то можно экспериментально доказать, что емкостное сопротивление зависит от частоты и емкости участка цепи (рис. 19).

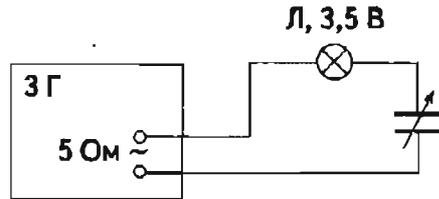


Рис. 19

Теоретически предскажите, как будет гореть лампочка при увеличении емкости, и как будет гореть лампочка при увеличении частоты колебаний?

Остается определить, как изменяется мощность на участке цепи с конденсатором. Для этого получим формулу для мгновенной мощности:

$$P = iu = -I_m U_m C \omega \cdot \cos \omega t \cdot \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) = -\frac{I_m U_m}{2} \sin 2\omega t.$$

График этой функции изображен на рис. 20. Для сравнения приведен график силы тока. Колебания мощности происходят по гармоническому закону, но с частотой в два раза большей, чем частота силы тока. График расположен симметрично относительно оси времени, поэтому четверть периода участок цепи с конденсатором поглощает энергию, вторую четверть — отдает энергию внешней цепи. В среднем за период энергия не расходуется: сколько поступает в систему, столько же и уходит.

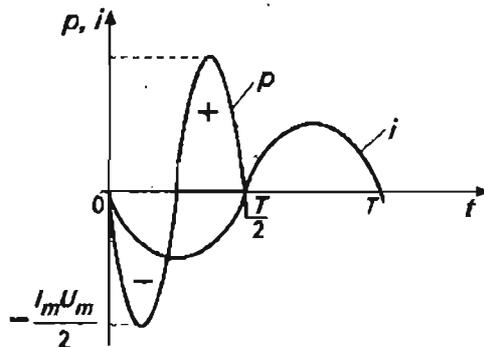


Рис. 20

### Переменный электрический ток на реальном участке цепи

В действительности участок цепи, по которому протекает переменный электрический ток, обладает свойствами активного, индуктивного и емкостного сопротивления одновременно. Правда, в разной степени. В каких-то случаях тем или иным сопротивлением можно пренебречь.

Опишем прохождение переменного электрического тока на участке цепи с активным, индуктивным и емкостным сопротивлением (рис. 21).

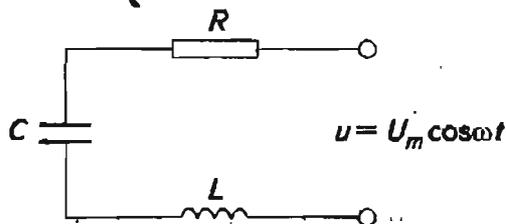


Рис. 21

Участок цепи представляет собой последовательное соединение трех сопротивлений. Отношения между физическими величинами для такого участка цепи значительно сложнее, поэтому обратимся к главным результатам.

Напряжение, подаваемое внешним генератором, в любой момент времени равно сумме напряжений на участках:  $U = U_R + U_L + U_C$ . Сила тока по закону последовательного соединения проводников одинакова на всех участках:  $i = I_m \cos(\omega t + \varphi)$ . На разных участках цепи между силой тока и напряжением есть свой сдвиг фаз.

Общее сопротивление цепи определяется так:

$$Z = \sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2}, \text{ где } R_L = L\omega, R_C = \frac{1}{C\omega}.$$

Важно отметить, что для такой цепи переменного тока на последовательно соединенных участках цепи нет простого суммирования сопротивлений. Поэтому для мгновенных (и действующих значений) выполняется закон Ома в следующей форме:

$$I_m = \frac{U_m}{Z}.$$

Наконец, необходимо выяснить, что происходит с энергией в такой цепи. Во-первых, в цепях переменного тока не вся энергия, поступающая извне, может потребляться. Часть её может возвращать-

ся генератору. Во-вторых, потребление энергии зависит от характера нагрузки. Например, на активном сопротивлении потребляется вся поступающая энергия. Для расчета среднего значения мощности было получено выражение:

$$P = IU \cos \varphi,$$

где  $\varphi$  — угол сдвига фаз между силой тока и напряжением. Величина  $\cos \varphi$  показывает, какая часть поступающей в цепь электрической энергии преобразуется в другие виды. Эту величину называют коэффициентом использования мощности.

В электротехнике существует целое направление исследования средств повышения величины  $\cos \varphi$  для конкретных электрических цепей. Например, повышение  $\cos \varphi$  с 0,2 до 0,8 равносильно увеличению использования мощности в четыре раза!

Как можно повысить коэффициент мощности? Раз  $\varphi$  — угол сдвига фаз между током и напряжением, то нужно стремиться сделать его как можно меньше. Это достигается подбором (сочетанием) индуктивного и емкостного сопротивлений. В частности, в электрической цепи параллельно участку с индуктивностью подключают конденсатор. Подбор значений емкости для сложных участков может быть непростой технической задачей.

### Явление резонанса в цепи переменного электрического тока

Представить, в чем состоит явление резонанса, проще всего с помощью эксперимента. Для этого рассмотрим реальный (и мысленный) эксперимент (рис. 22). На рисунке изображена установка, используемая в эксперименте. Исследуем, как зависит накал лампочки при повышении частоты колебаний подаваемого напряжения.

Генератор звуковой частоты .

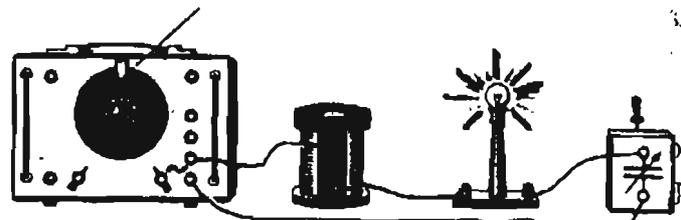


Рис. 22

Лампочка — это активное сопротивление, ее накал определяется энергией, выделяемой в единицу вре-

мени  $P = I^2 R$ . Увеличивается накал лампочки — значит, сила тока возрастает. В опытах обнаруживается, что при увеличении частоты внешнего напряжения сначала сила тока растет, в какой-то момент достигает максимума, затем уменьшается (рис. 23). Как теоретически объяснить такой результат?

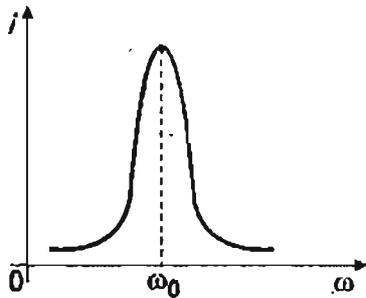


Рис. 23

Сила тока в электрической цепи зависит в конечном итоге от ее полного сопротивления:

$$Z = \sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2}.$$

Минимальное значение полного сопротивления достигается в том случае, когда  $R_L = R_C$ . В этом случае и наступает резкое увеличение амплитуды колебания силы тока на участке цепи, т. е. наблюдается явление резонанса.

Равенство индуктивного и емкостного сопротивлений для данной цепи возникает при определенной частоте, значение которой определяется параметрами цепи  $L$  и  $C$ . Получаем:

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$$

и выражаем:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Эта характеристика называется **собственной частотой** цепи. Если частота внешнего воздействия (в нашем случае напряжения генератора) совпадает с собственной частотой цепи:

$$\omega = \omega_0,$$

то происходит резонанс.

При резонансе цепь фактически состоит только из активного сопротивления, т. е. нет сдвига фаз между силой тока и напряжением. Хотя и до и после резонанса этот сдвиг фаз есть.

Очевидно, в реальных цепях переменного тока резонанс может быть опасен. Обычно частота внешних колебаний напряжения не меняется, но зато часто меняются параметры цепи  $L$  и  $C$ . И неожиданно может возникнуть условие резонанса. Резкое возрастание силы тока может вывести из строя электронные компоненты приборов.

### Краткое обобщение теоретического материала

Мы рассмотрели явление прохождения переменного тока в электрической цепи. На разных участках цепи ток характеризуется разными формулами взаимосвязи физических величин (схема 3). Природа всех взаимосвязанных изменений силы тока и напряжения — переменное электрическое поле. Наконец, во всех случаях выполняются закон сохранения энергии и закон Ома. Явление резонанса — это особый случай прохождения переменного электрического тока на участке цепи.

### Самостоятельная работа

Для ориентации в изученном материале следует найти ответы на следующие вопросы. Что такое переменный электрический ток? Какова природа (причина) существования этого физического явления? Почему переменный электрический ток относят к вынужденным электромагнитным колебаниям? Можно ли считать электромагнитные колебания в контуре переменным током? В результате какого внешнего действия на участке цепи, например с резистором, существует переменный электрический ток? Можно ли считать переменным током электрические колебания, которые происходят не по гармоническому закону? Какие физические величины и законы используют для описания переменного электрического тока? Почему важно знать сдвиг фаз между током и напряжением на участке цепи? Выполняется ли закон сохранения энергии при прохождении переменного тока на участке цепи с резистором? Охарактеризуйте переменный электрический ток, который мы используем в быту (уравнения напряжения и силы тока, период, фаза колебания, амплитудные значения и др.). Для чего вводят понятие о действующем значении силы тока и напряжения? Как оно определяется?

**СХЕМА 3**

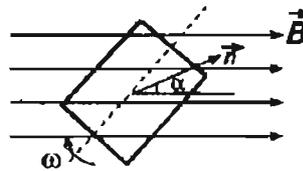
**ПЕРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК**



Незатухающие вынужденные колебания силы тока и напряжения на участке цепи



Явление электромагнитной индукции:



$$\Phi = BS \cos \alpha = BS \cos \omega t$$

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi}{dt} = -\Phi'$$

$$u = U_m \sin \omega t$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$$

**Активное сопротивление**

$$I_m = \frac{U_m}{R}$$

$$p = i^2 R = I_m^2 R \sin^2 \omega t$$

$$p = \frac{1}{2} I_m^2 R (1 - \cos 2\omega t)$$

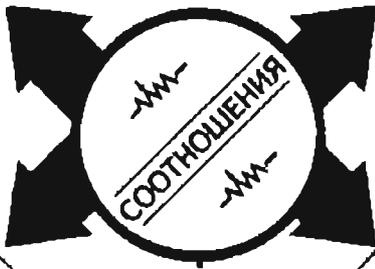
**Емкостное сопротивление**

$$\frac{q}{C} = U_m \sin \omega t$$

$$i = q' = U_m C \omega \cos \omega t$$

$$I_m = U_m C \omega; X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$I_m = \frac{U_m}{X_C}; I = \frac{U}{X_C}$$

$$p = \frac{1}{2} I_m U_m \sin 2\omega t$$


**Индуктивное сопротивление**

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L}; U_m = \frac{U}{X_L}$$

$$p = ui = \frac{I_m U_m}{2} \sin 2\omega t$$

$$P = IU \cos \varphi \Rightarrow \varphi = \frac{\pi}{2}$$

$$P = 0$$

**Реальный участок цепи**

$$u = U_m \sin \omega t$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$$

$$I = \frac{U}{Z}, \text{ где } I, U - \text{действующие значения}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

**Резонанс:**  $R$  — мало,  $X_L = X_C$

*Экспериментальные задания*

Эксперимент позволяет накопить факты о явлении, во многих случаях быстро и непосредственно получить значение нужной характеристики. Ниже приводятся задачи, связанные с экспериментальными исследованиями.

1. Изучите устройство и принцип действия электромагнитной системы амперметра и вольтметра. Какое значение силы тока показывает амперметр: действующее, мгновенное или амплитудное? Можно ли с помощью амперметра и вольтметра определить сопротивление резистора и потребляемую мощность (рис. 24)? Как это сделать?

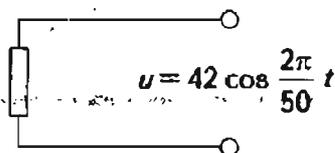


Рис. 24

2. Для определения наличия напряжения на участке цепи в быту часто используют пробник. Изучите устройство и принцип действия этого прибора. Можно ли в нем использовать неоновую лампочку, напряжение зажигания которой 300 В?
3. По данным на конденсаторе (получите его у преподавателя) рассчитайте его сопротивление при включении в цепь бытовой осветительной сети. Изменяется ли сопротивление конденсатора с течением времени или это постоянная величина?

*Практикум по решению задач*

**Пример решения качественной задачи**

Как и почему изменяется накал лампочек при увеличении частоты переменного тока (рис. 25)?

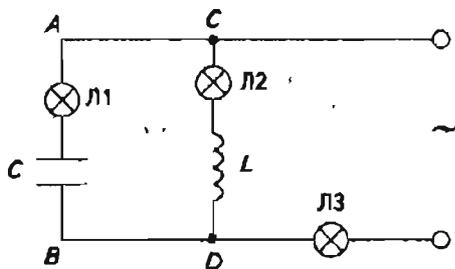


Рис. 25

**Анализ физического явления**

Наблюдаемое физическое явление — переменный электрический ток на участке цепи с конденсатором и на участке цепи с катушкой индуктивности. Лампочки играют роль индикаторов. Однако ток не просто переменный, его частота увеличивается. Как это можно реализовать в школьных условиях? (Можно использовать звуковой генератор в качестве источника переменного напряжения.)

Изучаемые участки цепи соединены параллельно, на них подается одинаковое напряжение. Накал лампочки зависит от силы тока (при постоянстве ее сопротивления). Значит, надо рассмотреть, как меняется сила тока на каждом из участков цепи.

**Решение**

Определение силы тока следует начинать с рассмотрения сопротивления каждого из участков цепи. Согласно определению сопротивлений:

$$R_L = L\omega \text{ и } R_C = \frac{1}{C\omega}$$

Следовательно, при увеличении частоты сопротивление участка *AB* уменьшается, а участка *CD* — увеличивается. При одинаковом напряжении в первом участке сила тока возрастает, во втором — уменьшается. Лампочка *Л1* горит ярче, а лампочка *Л2* — слабее.

**Вопросы для обсуждения**

1. Как изменится накал лампочки *Л3* в основной цепи?
2. Можно ли подобрать такую частоту напряжения, чтобы все три лампочки горели одинаково?

**Типичные расчетные задачи**

1. Напряжение в цепи переменного тока изменяется по закону  $u = 140\sin(314t)$ . Определить действующее значение напряжения, частоту колебания силы тока.
2. По графику (рис. 26) определить амплитудное значение и действующие значения напряжения, частоту и фазу колебаний.

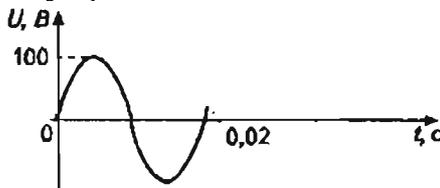


Рис. 26

3. Участок цепи переменного электрического тока осветительной сети состоит из последовательно соединенных активного сопротивления  $R=10$  Ом, конденсатора емкостью  $50$  мкФ и катушки с индуктивностью  $40$  мГн. Определить общее сопротивление данной цепи.

(Подсказка: следует подсчитать по известным формулам емкостное и индуктивное сопротивление; общее сопротивление равно сумме сопротивлений.)

4. Напряжение на участке цепи переменного тока изменяется по закону  $u = 210\sin 314t$ . Какое количество теплоты выделится в электроплите сопротивлением  $450$  Ом за час работы?

5. Определить сопротивление резистора, если емкость конденсатора  $2$  мкФ, частота переменного тока  $300$  Гц, а показания приборов соответственно  $14$  В и  $28$  В (рис. 27).

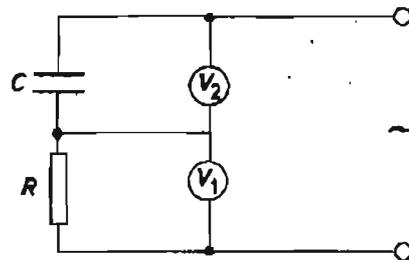


Рис. 27

### 3. ПОЛУЧЕНИЕ, ПЕРЕДАЧА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

*Конспект.*

*Таблица 1*

Трудно представить существование современной цивилизации без электроэнергии. Если в нашей квартире хотя бы на несколько минут отключается свет, то мы уже испытываем многочисленные неудобства. А что произойдет при отключении электроэнергии на несколько часов! Вот почему так важно представлять физические основы получения, передачи и использования переменного электрического тока. Ведь именно переменный электрический ток — основной источник электроэнергии. Энергия в форме энергии переменного электрического тока удобно и с высоким КПД получается, передается, распределяется между потребителями, превращается в другие формы энергии — механическую, тепловую и прочие.

#### Получение переменного электрического тока

Принцип получения переменного электрического тока был рассмотрен ранее — это механическое вращение проводящей рамки в магнитном поле (см. рис. 8). В соответствии с явлением электромаг-

нитной индукции по замкнутой рамке протекает переменный ток. Для промышленности важно получать переменный электрический ток большой мощности, причем максимально технологично.

Электрические машины, которые преобразуют механическую энергию в электрическую, называют генераторами. Индукционный генератор состоит из вращающегося электромагнита (или постоянного магнита) — ротора и неподвижной части машины — статора, в которой укладывается проводник в форме множества последовательно соединенных рамок (рис. 28). Ротор приводится во вращение различными способами. Обычно он находится на одном валу с паровой или газовой турбиной, двигателем внутреннего сгорания или гидротурбиной. Технически современный генератор переменного тока — сложное инженерное устройство.

Следует знать наиболее важные характеристики современных генераторов переменного тока. В таблице 1 приведены характерные данные мощного турбогенератора. С помощью турбогенераторов на ТЭЦ (теплоэлектростанциях) вырабатывается около 40% всей электроэнергии страны.

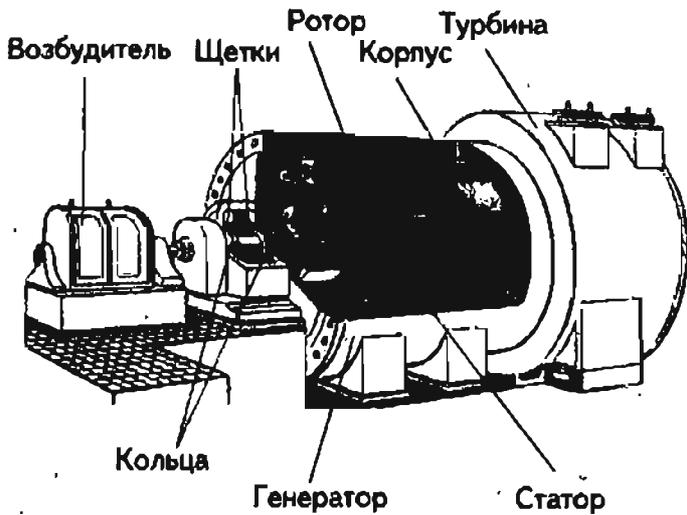


Рис. 28

У мощных турбогенераторов охлаждение осуществляется с помощью водорода, удельная теплоемкость которого в 14 раз больше воздуха. Охлажденный газ принудительно прокачивают через зазоры. У гидрогенераторов масса ротора достигает до 800 тонн! При этом для обеспечения постоянной и точной частоты выходного напряжения ротор должен вращаться с постоянной скоростью. В настоящее время существует множество моделей генераторов с самыми разными параметрами.

**Передача переменного электрического тока. Трансформатор**

Генератор электрического тока не может накапливать электроэнергию. После получения она должна сразу же передаваться потребителям. Как это делается?

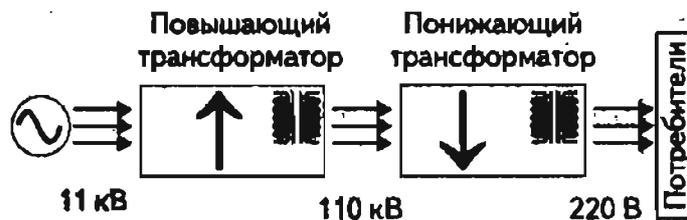


Рис. 29

На рис. 29 приведена схема передачи электроэнергии от генератора к потребителям. Почему между генератором и потребителем электроэнергии должен еще использоваться трансформатор? Дело в том, что генераторы большой мощности в 800–1000 МВт производят токи сравнительно неболь-

Таблица 1. Технические параметры турбогенератора большой мощности

Название характеристики (параметра)	Значение параметра
1. Масса	600 тонн
2. Мощность	1200 МВт
3. Напряжение на выходе	24 кВ
4. КПД	99 %
5. Скорость вращения ротора	3000 об/мин
6. Коэффициент мощности cos φ	0,9

шого напряжения 10–20 кВ, но значительной силы тока — до 500 000 А. Такие токи при передаче по проводам будут сильно нагревать проводник согласно закону Джоуля-Ленца  $P = I^2R$ . При этом потери электроэнергии могут быть значительными.

Получим формулу для расчета потерь электроэнергии при передаче ее по проводнику длиной  $l$  с поперечным сечением  $S$ . Из формулы для мощности переменного тока выразим силу тока и подставим в выражение для потери энергии:

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi} \Rightarrow P_R = I^2 R \Rightarrow P_R = \frac{2\rho P^2 l}{SU^2 \cos^2 \varphi}$$

Здесь  $P_R$  — потеря энергии на сопротивлении  $R$ , т.е. тепловая потеря. При большой протяженности линий передач в несколько сот километров и большой мощности потери могут быть громадными. Вот почему возникает необходимость в повышении напряжения, увеличении сечения проводников (но тут свои ограничения!) и в повышении коэффициента использования мощности.

Устройство для повышения или понижения напряжения переменного электрического тока называют трансформатором. Первый трансформатор был изобретен русским электротехником Н. П. Яблочковым в 1878 г. Самый простой трансформатор состоит из замкнутого стального сердечника, на который надеты две катушки с разным числом витков. Основные сведения о трансформаторе приведены на схеме 4.

**СХЕМА 4**

**ТРАНСФОРМАЦИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**



**ПАУК**

П. Н. Яблочков  
1878 г.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ**

Трансформатор — прибор для преобразования переменного напряжения

**УСТРОЙСТВО**

магнитопровод

**ПРИНЦИП РАБОТЫ**

**Явление электромагнитной индукции**

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi$$

$$e_1 = -n_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$e_2 = -n_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{n_1 \Phi'}{n_2 \Phi'} = \frac{n_1}{n_2}$$

**ХАРАКТЕРИСТИКИ**

**Холостой ход**

$$R_H = \infty$$

$$I_2 = 0$$

$$e_2 = -u_2$$

$$e_1 \approx -u_1, \text{ т. к. } I_0 \text{ — мало, } R_1 \text{ — мало}$$

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} = K$$

**Рабочий ход**

$$P_1 \approx P_2 \rightarrow I_1 U_1 \approx I_2 U_2$$

$I_1$  растет при увеличении нагрузки

$\eta = 90-99\%$

**ПРИМЕНЕНИЕ**

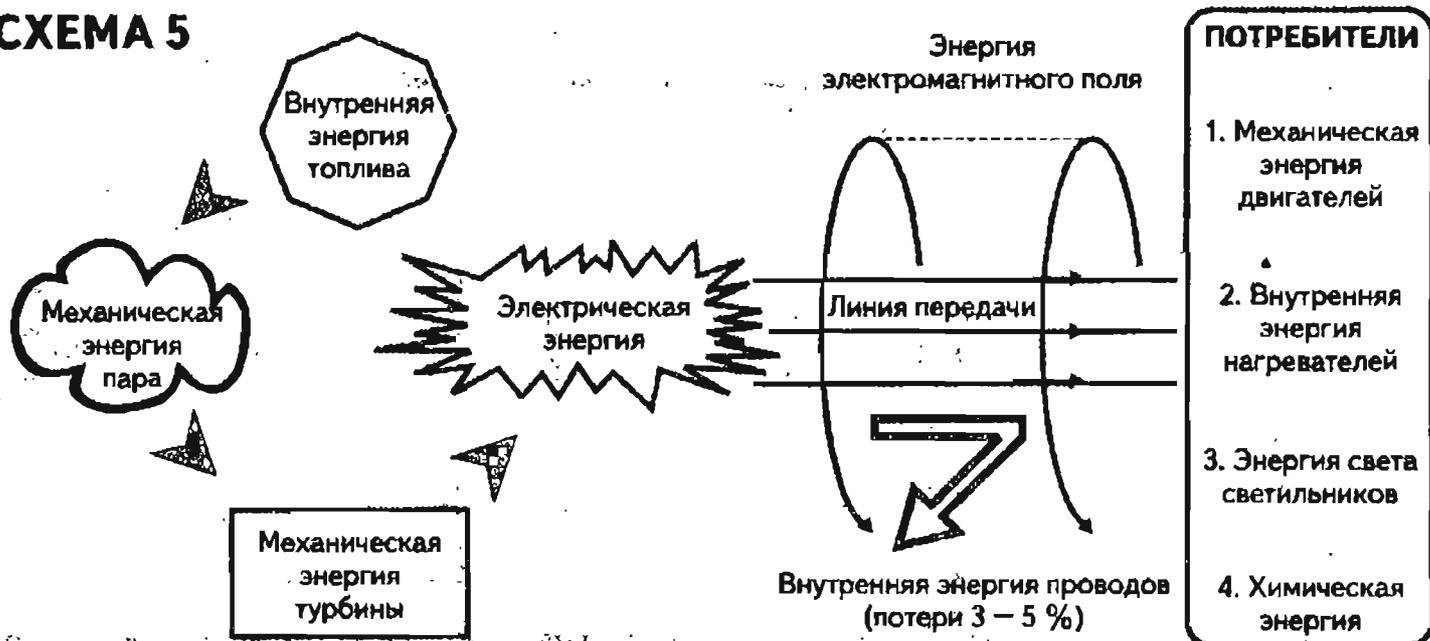
11 кВ    110 кВ    35 кВ    6 кВ    220 В

генератор    потребители

Tr    Tr

линии передачи

**СХЕМА 5**



**Устройство трансформатора**

Стальной сердечник собирают из отдельных листов специальной стали, изолированных друг от друга тонким слоем лака. Это делается для того, чтобы уменьшить вихревые токи (а отсюда и потери энергии). Токи Фуко возникают в замкнутом сердечнике по закону электромагнитной индукции. При малом сопротивлении сердечника токи могут быть большими. Вот почему сердечник собирают из отдельных пластин. Сердечник трансформатора называют еще магнитопроводом.

Катушку, к которой подводится напряжение, называют *первичной*; катушку, к которой подключают нагрузку, называют *вторичной*. Мощные трансформаторы для охлаждения помещают в бак с маслом.

**Работа трансформатора**

Магнитный поток  $\Phi$ , который пронизывает катушки, практически одинаковый. При его изменении в каждом отдельном витке первичной или вторичной катушки возникает одинаковая ЭДС. Но катушки имеют разное число витков. Если  $K = \frac{n_1}{n_2} > 1$ , то трансформатор понижает напряжение. И наоборот. Коэффициент трансформации  $K$  — важная характеристика трансформатора. Вторая важная характеристика — мощность.

При холостом ходе, т. е. когда трансформатор подсоединен к сети, но нагрузки нет, во вторичной обмотке тока нет, в первичной он небольшой. Энергия идет лишь на компенсацию потерь, возникающих при перемагничивании сердечника и при нагревании проводов первичной катушки.

При подключении нагрузки вторичная цепь начинает потреблять энергию — она поступает через первичную обмотку из сети. Поэтому сила тока в первичной обмотке возрастает, т. е. растет мощность  $P_1$ . При этом по закону сохранения энергии  $P_1 = P_2$ . Повышение мощности не может быть бесконечным, оно должно соответствовать конструкции трансформатора. Иначе трансформатор выйдет из строя.

**Использование переменного электрического тока**

Снабжение электроэнергией потребителей — важная задача, государственная по значению. В основном электроэнергия передается с помощью переменного тока, точнее, с помощью переменного электромагнитного поля. Это поле распространяется с громадной скоростью  $300\,000 \frac{\text{км}}{\text{с}}$  и ответственно за возникновение переменного тока на различных участках цепи. После генерации переменный ток передается к потребителям через систему электрических сетей. В европейской части

нашей страны действует единая энергосистема. На пути от генератора до потребителя электрический ток несколько раз трансформируется.

На схеме 5 показано, как преобразуется энергия от места получения до места потребления.

Невозможно привести полный перечень устройств и приборов, для работы которых используется переменный электрический ток. Приведем лишь типичные и значимые примеры: лампочки электрического освещения, электронные бытовые устройства (телевизор, видеомагнитофон, аудиосистемы и др.), электрические приборы и инструменты (электропаяльники, электрорубанки, электродрели, тостеры и т. п.), электромоторы троллейбусов и электропоездов...

*Самостоятельная  
работа*

**Ответить на вопросы**

В чем технические сложности передачи электроэнергии на большие расстояния? Почему в энергосистеме необходимо использовать целую систему трансформаторов разной мощности и разного напряжения? Почему стремятся строить единые системы электроснабжения территорий? Каковы особенности электрической энергии? Возможно ли создание единой энергосистемы на основе генераторов, которые производят переменный электрический ток разной частоты? Почему не получают и не используют переменный электрический ток частотой, скажем, 5 Гц? Почему для современных энергосистем так важен трансформатор? Каков принцип его действия? Каковы основные характеристики трансформатора? Есть ли у вас дома трансформаторы напряжения? На рис. 30 показано изменение КПД трансформатора от мощности, потребляемой на нагрузке (где  $P_n$  — расчетная мощность трансформатора). Почему КПД изменяется?

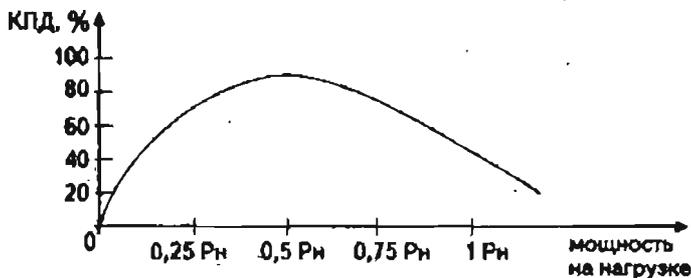


Рис. 30

**Решить самостоятельно**

1. Лампочка и конденсатор последовательно включены в цепь переменного электрического тока. Изменится ли накал лампочки, если закоротить конденсатор? Как поведет себя трансформатор, если ошибочно вместо переменного к нему подключили постоянный электрический ток? Оцените, какая часть энергии топлива потребляется электрической лампочкой (см. схему 5). Какое количество электроэнергии в течение года может оказаться неучтенным, если погрешность электросчетчика 2,5%?
2. На графике (рис. 31) показано изменение потребления электроэнергии типичного города в течение суток. Объясните причину пиков нагрузки. Постройте подобный график потребления электроэнергии в своей квартире.

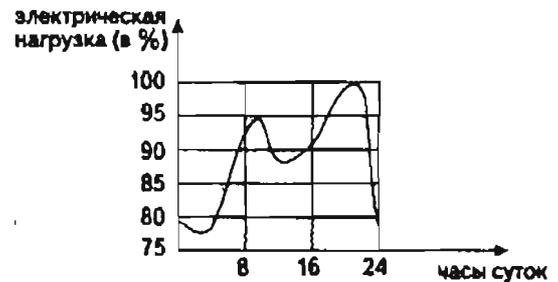


Рис. 31

3. Первичная обмотка трансформатора имеет 800 витков. Сколько витков имеет вторичная обмотка, если напряжение понижается от 220 В до 6 В?
4. Понижающий трансформатор с коэффициентом трансформации  $K = 10$  включен в сеть с напряжением 220 В. Каково напряжение на выходе трансформатора, если сопротивление нагрузки 10 Ом, а сопротивление вторичной катушки 1 Ом?

*Контрольная  
работа*

Работа рассчитана на 30–35 мин.

**Вариант 1**

1. Определить частоту собственных электромагнитных колебаний контура, если индуктивность катушки 1 мГн, а емкость конденсатора 100 нФ.

2. Сила тока в первичной обмотке трансформатора равна 0,2 А, а напряжение — 220 В. Каковы напряжение и сила тока во вторичной обмотке, если коэффициент трансформации 0,1?

3. Дать определение автоколебательной электрической системы. С помощью блок-схемы показать преобразования энергии в такой системе, изобразить график колебаний силы тока в системе.

**Вариант 2**

1. Резонанс в колебательном контуре наступает при частоте внешних колебаний 10 МГц. Определить индуктивность катушки, если емкость конденсатора 50 пФ.

2. Трансформатор повышает напряжение с 220 В до 660 В. Сколько витков содержит вторичная катушка, если в первичной 840 витков? В какой из обмоток провод большего сечения? Для чего это необходимо?

3. Изобразите график колебания напряжения на конденсаторе в закрытом колебательном контуре. Почему реально электромагнитные колебания в закрытом колебательном контуре затухают?

*Творческие задания*

Для теоретического изучения вопросов, подготовки реферата или выступления можно выбрать одну из следующих тем.

1. Характеристики первичных источников электрической энергии (ветряные, солнечные, термальные, приливные, тепловые и др.).

2. Современные электрогенераторы: техническая реализация физических идей, параметры, тенденции совершенствования.

3. Современные системы передачи электроэнергии: неравномерность нагрузки и приемы ее сглаживания, обслуживание сетей, аккумуляторные станции и др.; построение схемы распределения электрической мощности в своем районе.

4. Экологические проблемы современной энергетики.

*Школьный тест*

Задание выполняется дома или в школе; на «отлично» необходимо выполнить 15 заданий из 20

**Задания на понимание процесса познания физических объектов и явлений**

1. В каком из ответов верно перечислены параметры, характеризующие колебательный контур?

- А. Масса катушки, емкость, период.
- Б. Температура, частота, индуктивность.
- В. Период, индуктивность, емкость.
- Г. Период, индуктивность, сила.
- Д. Нет верного ответа.

2. Выберите ответ, в котором перечислены только объекты и явления природы.

- А. Колебательный контур, сила тока, емкость.
- Б. Емкость, электромагнитные колебания, катушка.
- В. Индуктивность, конденсатор, электромагнитные колебания.
- Г. Переменный электрический ток, электрон, проводник.
- Д. Нет верного ответа.

3. На рис. 32 изображен колебательный контур. Какую из приведенных ниже гипотез можно экспериментально проверить с помощью установки, собранной по приведенной схеме?

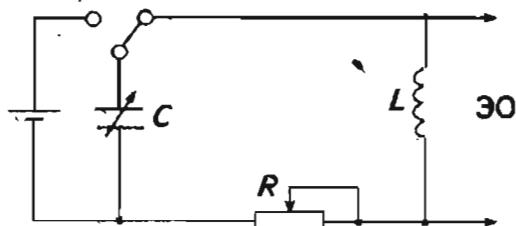


Рис. 32

- А. Период электромагнитных колебаний не зависит от емкости конденсатора.
- Б. Период электромагнитных колебаний изменяется с индуктивностью катушки.
- В. Период электромагнитных колебаний зависит от сопротивления реостата.

- Г. Частота электромагнитных колебаний зависит от емкости конденсатора.
  - Д. Изменение активного сопротивления контура не приводит к каким-либо результатам.
4. На каком явлении основано промышленное получение переменного электрического тока?
- А. Правило Ленца.
  - Б. Электромагнитная индукция.
  - В. Превращение одного вида энергии в другой.
  - Г. Вращение рамки с переменным током.
  - Д. Нет верного ответа.
5. Какие модели использовались при изучении электромагнитных колебаний?
- А. Резонанс, активное сопротивление.
  - Б. Идеальный колебательный контур, формула Томсона.
  - В. Колебательный контур, индуктивность.
  - Г. Емкость, свободные колебания.
  - Д. Нет верного ответа.

**Качественное описание физических объектов и явлений**

6. На рис. 33 приведены графики колебания напряжения на конденсаторе за первый период в одном и том же колебательном контуре. В каком случае электромагнитные колебания будут существовать дольше?

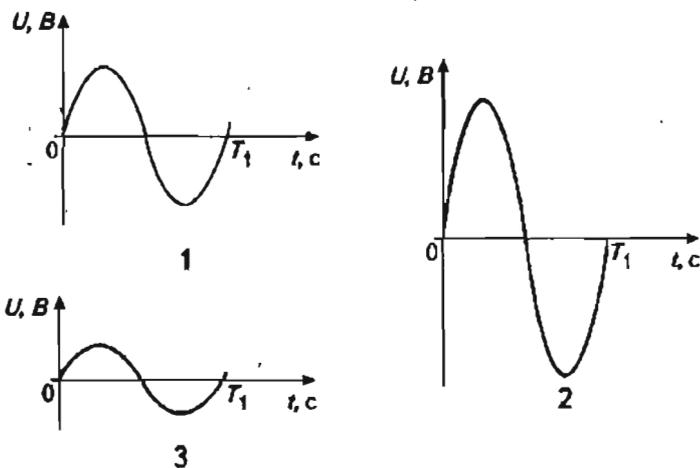


Рис. 33

- А. 1.
- Б. 2.
- В. 3.
- Г. Одинаково.
- Д. Нельзя дать ответ.

7. Как изменится период свободных электромагнитных колебаний в контуре при изменении емкости конденсатора в 4 раза?
- А. Уменьшится в 4 раза.
  - Б. Уменьшится в 2 раза.
  - В. Увеличится в 4 раза.
  - Г. Увеличится в 2 раза.
  - Д. Нет верного ответа.
8. Какой из графиков выражает зависимость емкостного сопротивления от частоты переменного тока (рис. 34)?

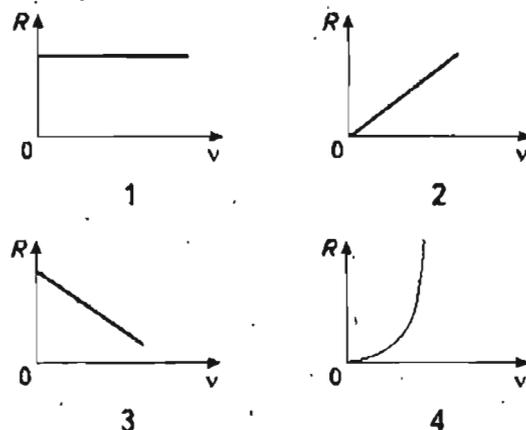


Рис. 34

- А. 1.
- Б. 2.
- В. 3.
- Г. 4.
- Д. Нет соответствующего графика.

9. Как изменится накал лампочки, если последовательно конденсатору подключить еще один такой же конденсатор (рис. 35)?

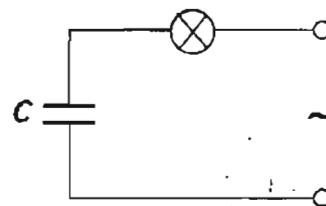


Рис. 35

- А. Не изменится.
- Б. Уменьшится.
- В. Увеличится.
- Г. Лампочка потухнет.
- Д. Нет верного ответа.
10. При каких условиях наступает явление резонанса в цепи переменного тока?
- А. Малое активное сопротивление.
- Б. Внешнее переменное действие.
- В. Равенство индуктивного и емкостного сопротивлений.
- Г. Равенство частоты собственных колебаний цепи частоте подаваемого напряжения.
- Д. Нет верного ответа.
11. Каков принцип работы трансформатора переменного электрического тока?
- А. Преобразование электрической энергии.
- Б. Преобразование электрической энергии в механическую энергию.
- В. Изменение параметров переменного тока с помощью явления электромагнитной индукции.
- Г. Преобразование электрической энергии в магнитную и обратно.
- Д. Нет верного ответа.
12. Для чего необходимы трансформаторы переменного электрического тока? Из предложенных ответов выберите наиболее точный.
- А. Для передачи электрической энергии.
- Б. Для преобразования переменного тока в постоянный.
- В. Для преобразования переменного тока в переменный ток другой частоты.
- Г. Для преобразования переменного тока в переменный ток, но другого напряжения.
- Д. Для преобразования постоянного тока в переменный.

13. Электрическую плиту первый раз включили в цепь переменного электрического тока с напряжением 220 В, второй раз — в цепь постоянного тока того же напряжения. В каком случае плита нагреется сильнее?

- А. В первом случае.
- Б. Во втором случае.
- В. Одинаково.
- Г. Нельзя определить.
- Д. Нет верного ответа.

14. Какая из формул описывает сопротивление катушки в цепи переменного электрического тока?

- А.  $R = \rho \frac{l}{S}$ .
- Б.  $\omega L$ .
- В.  $\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ .
- Г.  $\omega C$ .
- Д. Нет верного ответа.

**Задания на количественное описание физических объектов и явлений**

15. В колебательном контуре максимальная энергия конденсатора равна  $2 \cdot 10^{-6}$  Дж. Какова будет его энергия через полпериода после начала колебаний?

- А.  $2 \cdot 10^{-6}$  Дж.
- Б. Нуль.
- В.  $1 \cdot 10^{-6}$  Дж.
- Г.  $4 \cdot 10^{-6}$  Дж.
- Д. Нет верного ответа.

16. Каково действующее значение напряжения, если напряжение в цепи переменного электрического тока изменяется по закону  $u = 140 \sin(100t)$ ?

- А. 140 В.
- Б. 100 В.
- В. 220 В.
- Г. 360 В.
- Д. 110 В.

17. Напряжение в цепи переменного электрического тока изменяется по закону  $u = 200\sin(20\pi t)$ . Каково амплитудное значение силы тока на резисторе сопротивлением 5 Ом?
- А. 5 А.
- Б. 10 А.
- В. 15 А.
- Г. 20 А.
- Д. Нет верного ответа.
18. На первичную обмотку трансформатора, состоящую из 600 витков, подано напряжение 220 В. Каково напряжение на вторичной обмотке, если она состоит из 300 витков?
- А. 220 В.
- Б. 300 В.
- В. 100 В.
- Г. 110 В.
- Д. 360 В.

**Задания повышенной сложности**

19. Какова сила тока в колебательном контуре в момент полной разрядки конденсатора? Энергия магнитного поля катушки  $2 \cdot 10^{-4}$  Дж, а ее индуктивность 1 Гн.
- А. 2 А.
- Б. 0,2 А.
- В. 4 А.
- Г. 0,4 А.
- Д. Нет верного ответа.
20. При холостом ходе трансформатор потребляет мощность 2 Вт, в режиме работы при номинальной мощности 400 Вт его КПД составляет 96 %. Каковы потери энергии на нагревание обмоток трансформатора?
- А. Потерь энергии нет.
- Б. 16 Вт.
- В. 20 Вт.
- Г. 14 Вт.
- Д. Нет верного ответа.



# Электромагнитные волны

## Изучив эту тему,

- вы узнаете характеристики и свойства электромагнитных волн;
- поймете принципы работы радиотехнических устройств;
- научитесь математически описывать явления, связанные с распространением электромагнитных волн

## Основные понятия:

Электромагнитное поле • Электромагнитная волна  
• Фронт волны • Волновой луч • Волновая поверхность • Длина и частота волны • Поток излучения • Интенсивность излучения • Принцип суперпозиции  
• Когерентность • Интерференция • Дифракция • Дисперсия • Поляризация • Радиосвязь • Радиолокация • Телевидение

## 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ВОЛНА

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

С точки зрения современной физики в природе всего два объекта изучения — вещество и поле (волны). А богатство окружающего мира объясняется разнообразием вещественных образований (от галактик до элементарных частиц) и разнообразием проявлений физических полей, в частности, электрических и магнитных.

В разделе рассматривается одно из фундаментальных полей — электромагнитное поле. Электромагнитная волна — это распространяющееся в пространстве и во времени электромагнитное поле. Основная задача науки — выделить свойства данных физических объектов и найти средства описания свойств. Структура и основные вопросы раздела показаны на схеме 6.

СХЕМА 6

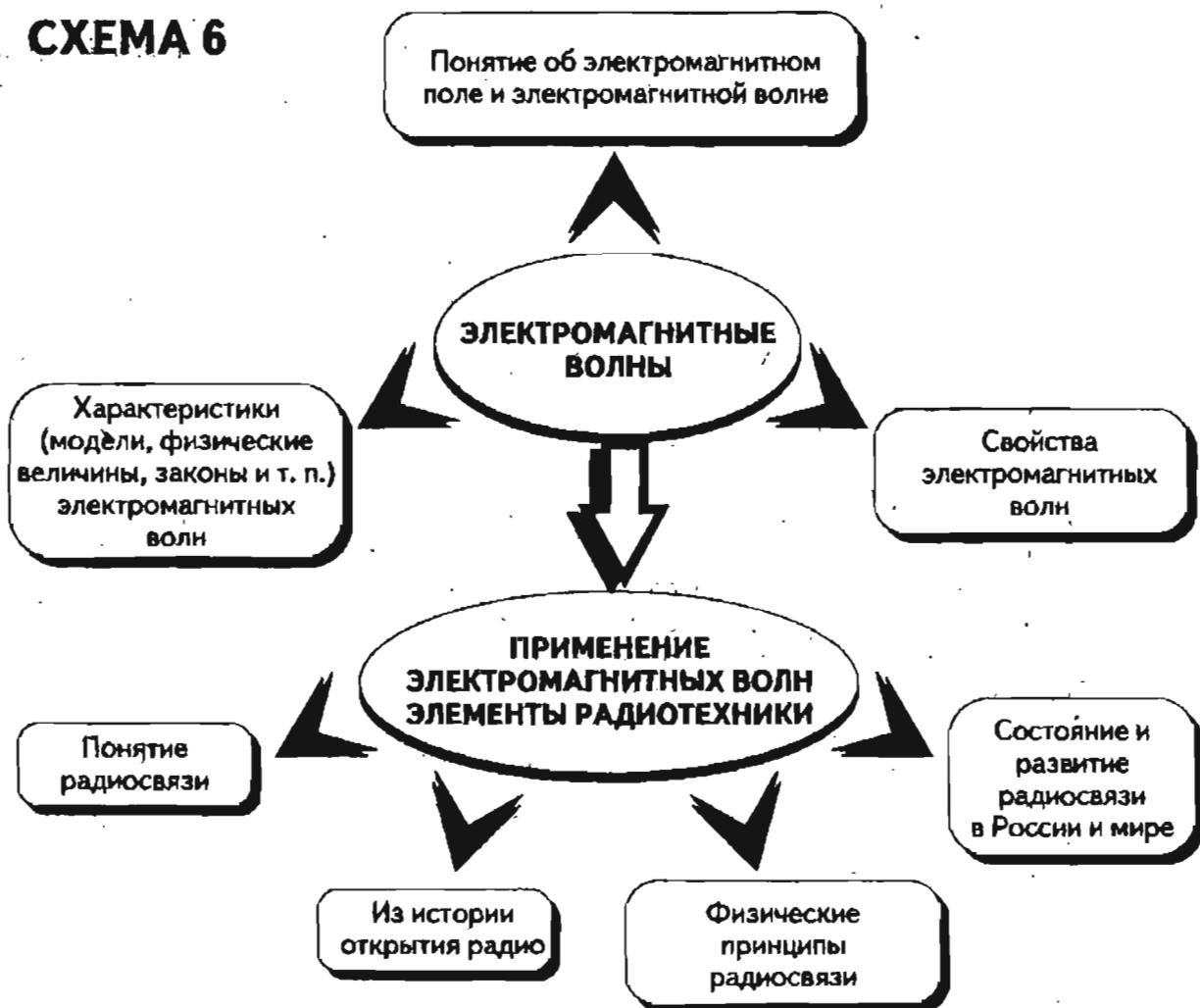


СХЕМА 7



Познание физического объекта или явления начинается с его выделения из мира окружающих объектов (явлений). Обычно это выделение происходит на основе свойств изучаемого объекта. После определения объекта его изучение продолжается в направлении поиска средств описания его свойств — физических величин и других характеристик. Кроме того, могут быть открыты новые явления, найдены новые применения объекта в жизни человека — технике, быту, медицине, науке.

Если физический объект реально существует (это подтверждается практикой!), то его познание будет продолжаться до тех пор пока существует человечество. Но исторически, особенно в начале изучения объекта или явления, бывало и так, что объект выделялся нечетко или даже неверно. Потом ошибка исправлялась. Например при изучении электромагнитных волн ошибочным было выделение эфира как объекта природы. Несмотря на многочисленные попытки ученых, экспериментально эфир не был обнаружен.

Немало гипотез о существовании явлений и объектов было отвергнуто. Научное познание всегда было нелегким делом. И шло от простого к сложному, от неточных представлений к более точным, т. е. к строгому знанию. Поэтому и при рассмотрении вопросов темы ваши знания будут постепенно уточняться.

### Электромагнитное поле и его частные проявления

Что такое электромагнитное поле? Самый общий ответ — физический объект, но физический объект, существенно отличающийся от вещества (схема 7).

Электромагнитное поле — один из двух видов материи, особая форма ее существования. Свойства поля как вида материи:

- а) действует на электрические заряды, и по этому действию может быть обнаружено;
- б) распространяется с высокой, но конечной скоростью —  $300\,000 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ ;
- в) существуют разные поля (по виду проявления, по энергетическим характеристикам и др.).

В разных ситуациях электромагнитное поле проявляет себя по-разному (см. табл. 2). Прежде всего, это зависит от того, в какой системе отсчета электромагнитное поле рассматривается (изучается).

Подчеркнем — выбор системы отсчета осуществляет наблюдатель, т. е. человек. Если, например, в системе отсчета  $XOY$  наблюдатель и электрический заряд неподвижны относительно друг друга, то наблюдатель фиксирует лишь постоянное электрическое поле (рис. 36). Но для другого наблюдателя, находящегося в другой системе отсчета  $X^*OY^*$ , этот же заряд движется, а, значит, около него существует еще и постоянное магнитное поле, т. е. магнитное поле тока (рис. 37).

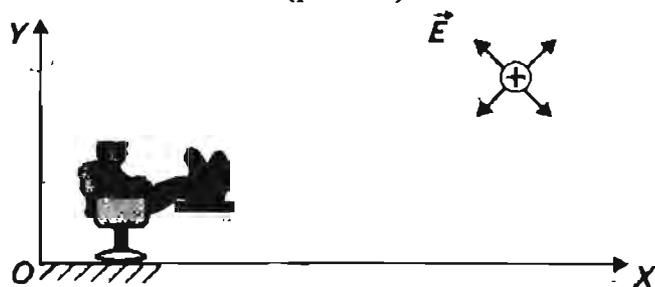


Рис. 36

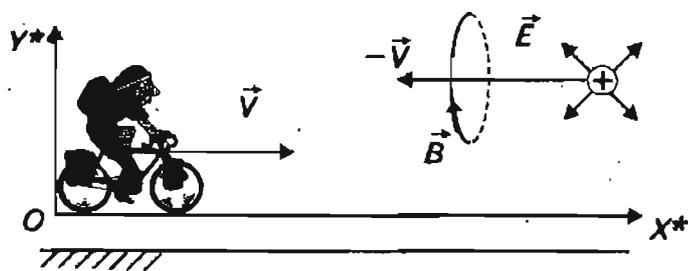


Рис. 37

Инерциальных систем отсчета бесконечно много, и все они равноправны. Поэтому одно и то же электромагнитное поле (от одного источника) проявляет себя по-разному в зависимости от выбора наблюдателем системы отсчета для изучения поля. Говорят, что *электромагнитное поле — релятивистский объект*.

Самая важная роль электромагнитного поля — осуществление взаимодействия между зарядами (а значит, и телами). При этом передается энергия. Как же с помощью поля происходит передача энергии? Ниже будет дан ответ на этот вопрос.

### Электромагнитная волна

Что же такое электромагнитная волна? Что в ней происходит, т. е. какова природа этого физического объекта? Электромагнитная волна представляет собой распространение в пространстве с течением времени переменных (вихревых) электрических и магнитных полей.

Хороший образ этого процесса дает опыт (рис. 38), который демонстрируется в классе. Источник тока может быть разный — от выпрямителя до батарейки; замыкается он ненадолго. Индикатором тока может служить амперметр или даже компас. При замыкании цепи в первое время электрическое поле возрастает от нулевого до некоторого значения. Именно в этот момент переменное электрическое поле порождает в сердечнике *A* переменное магнитное поле. Оно хорошо распространяется по сердечнику и пронизывает витки катушки 2, в итоге в катушке, согласно закону электромагнитной индукции, образуется электрическое поле. Это поле — тоже переменное. Процесс продолжается по всей цепочке.

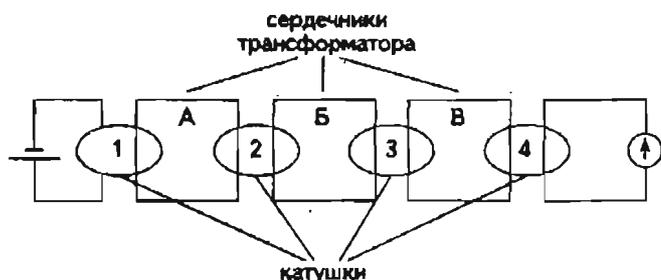


Рис. 38

Теоретическая модель электромагнитной волны представлена на рис. 39. В волне по гармоническому закону изменяются векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$ , причем во взаимно перпендикулярных плоскостях. На рисунке дан «моментальный снимок» распределения характеристик электрических и магнитных полей в пространстве. С течением времени «горб» перемещается по оси *X* вправо со скоростью *c*. Очевидно, что электромагнитная волна — поперечная: колебания  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  происходят перпендикулярно направлению распространения волны.

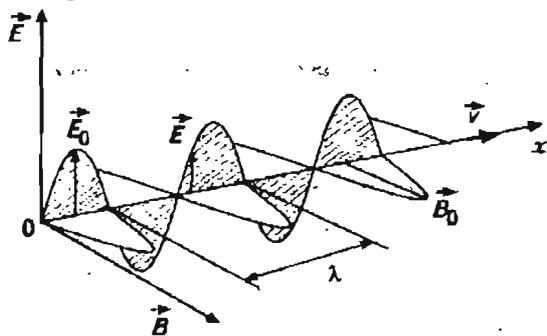


Рис. 39

Следующий вопрос: при каких условиях происходит излучение электромагнитных волн?

Для существования электромагнитного поля (и излучения волны) необходимо создать переменное электрическое поле. Оно возникает при ускоренном движении электрического заряда, например при его колебаниях в колебательном контуре. Из формулы  $T = 2\pi\sqrt{LC}$  следует, что чем меньше индуктивность *L* и емкость *C*, тем меньше период, а значит, больше частота колебаний. Достаточно высокая частота электрических колебаний является необходимым условием образования интенсивных электромагнитных волн. Таким образом, возникают «хорошие условия» для излучения электромагнитной волны. Но в колебательном контуре (рис. 40, а) переменное электромагнитное поле существует лишь между пластинами конденсатора; излучение волн — минимально. Как быть?

Впервые в 1886 г. решение нашел немецкий физик Г. Герц. Он так изменил колебательный контур (рис. 40, б, в, г), чтобы переменное электрическое поле охватывало все пространство около контура (рис. 40, г). Для возбуждения колебаний проводник разрезали посередине (рис. 41) и заряжали концы от источника высокого напряжения. Энергию в этот открытый колебательный контур можно подавать и с помощью индуктивной связи (рис. 42).

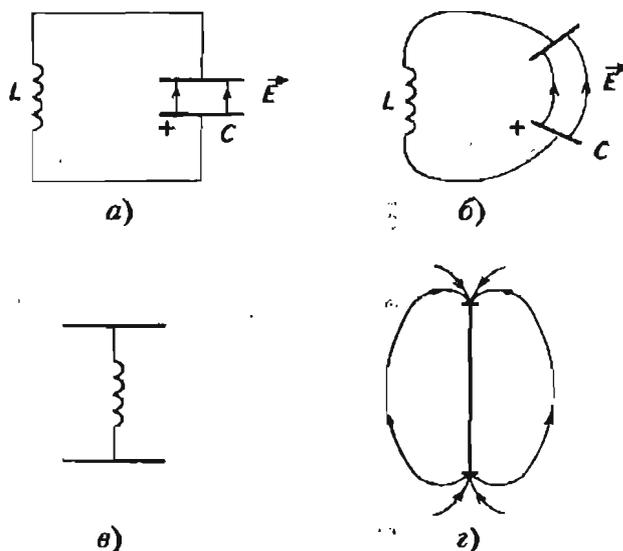


Рис. 40

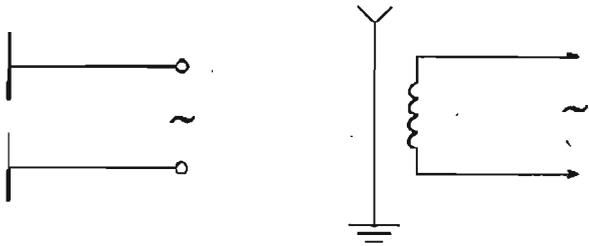


Рис. 41

Рис. 42

Остается только на опыте проверить верность теоретических рассуждений. Проще всего использовать схему опыта Герца: диполь (1) заряжается с помощью электрофорной машины или прибора «Разряд - 1», электромагнитная волна регистрируется с помощью обычного транзисторного приемника или приемного диполя, подключенного к осциллографу (2) (см. рис. 43).

Подведение итогов и систематизация результатов исследований приведена на схеме 8.

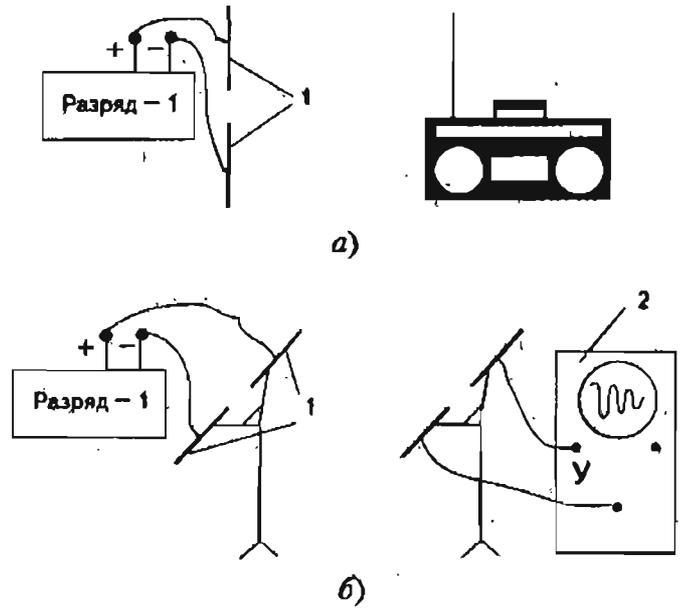


Рис. 43

### СХЕМА 8

**ФАКТЫ**



- ✓ Единое электромагнитное поле; другие поля (электрическое, магнитное и т. д.) лишь его частные проявления
- ✓ Электромагнитные волны

**МОДЕЛЬ**



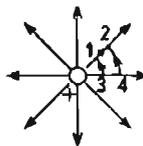
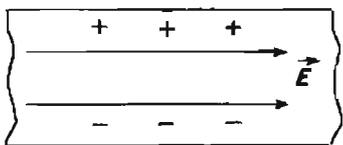
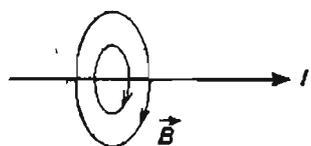
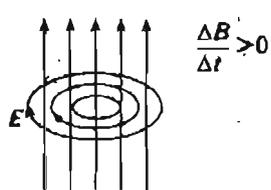
- ✓ Связь переменного магнитного поля и электрического поля
- ✓ Связь переменного электрического и магнитного поля

**СЛЕДСТВИЯ**



- ✓ Излучение и прием электромагнитных волн
- ✓ Многочисленные следствия существования электромагнитных волн: их свойства, использование и т. д.

Таблица 2

ЧАСТНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ		
Вид поля	Источник и характер	Характеристики поля
Электростатическое	Источник: электрические заряды  Характер: потенциальное $A_{1234} = 0$	$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad \vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad \Delta\phi$ Принцип суперпозиции полей $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n$ Плотность энергии $w = \frac{\epsilon_0}{2} E^2$
Стационарное электрическое	Источник: поверхностные заряды внутри проводника  Характер: потенциальное	$E = \text{const}$ при $S = \text{const}$ $u = \frac{A}{q}, \quad u_{12} = \phi_1 - \phi_2,$ $u_{12} = IR$ $u = u_{\text{вн}} = E \cdot l$ — закон Ома
Стационарное магнитное	Источник: движущиеся с постоянной скоростью заряды  Характер: вихревое — силовые линии замкнуты	$B = \frac{F}{Il}$ Поле прямого тока $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$ Поле катушки с током $B = N \frac{\mu I}{\alpha}$ Принцип суперпозиции полей $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \dots + \vec{B}_n$ Плотность энергии $w = \frac{B^2}{2\mu_0}$
Вихревое электрическое	Источник: переменное магнитное поле  Характер: вихревое — силовые линии замкнуты	$\mathcal{E}_1 = \frac{A_{\text{поле}}}{q}$ $\mathcal{E}_1 = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \text{— закон Фарадея}$

*Самостоятельная работа*

В основном надо отработать и знать следующее: частные проявления электромагнитного поля, их характеристики; определение и свойства электромагнитного поля.

1. Какие экспериментальные факты указывают на связь электрического и магнитного полей? Какие аргументы можно привести для доказательства существования электромагнитного поля? Что реально существует в природе: силовые линии электрического поля или электрическое поле? Какие теоретические модели использовались при изучении электрических и магнитных полей?
2. В 1873 г. английский физик Дж. К. Максвелл писал:



«Я предпочел... объяснить взаимодействия между удаленными друг от друга телами без допущения существования сил, способных непосредственно действовать на заметных расстояниях. Та теория, которую я предлагаю, может быть названа теорией электромагнитного поля...»

В чем суть идеи (модели) близкодействия на примере взаимодействия зарядов? Какая из моделей взаимодействия (дальнодействие или близкодействие) с точки зрения современной физики точнее?

3. При каких условиях в пространстве между обкладками конденсатора (рис. 44) возникает переменное магнитное поле? Что в данном случае является источником переменного магнитного поля? Может ли постоянное электрическое поле существовать отдельно от зарядов? Как будут направлены силовые линии вихревого электрического поля, если магнитное поле в данной области пространства изменяется так, как показано на рисунке (рис. 45)?

Предлагаемые ниже вопросы и задания можно использовать для само- и взаимопроверки при работе в классе и дома.

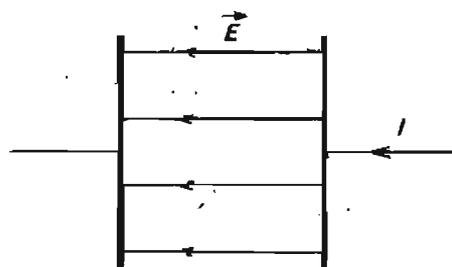


Рис. 44

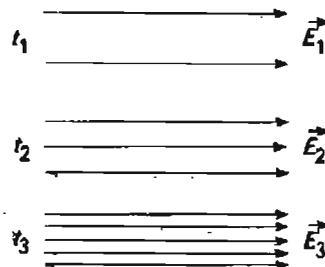


Рис. 45

1. Каково значение опытов Герца? Почему гипотеза Максвелла о существовании электромагнитных волн имела большое значение для развития физики? На какие экспериментальные факты опирался Максвелл при выдвижении своей гипотезы? Что нужно было сделать для полного доказательства гипотезы Максвелла?
2. Теоретически докажите, что бесконечной гармонической волны (рис. 39) в природе не существует. Какие экспериментальные факты доказывают, что электромагнитная волна переносит энергию? На что расходуется энергия, подводимая к диполью?

*Контрольная работа*

Контрольная работа носит тренировочный характер, ее результаты должны использоваться при корректировке дальнейшего изучения вопросов раздела.

**Вариант 1**

1. С какой скоростью распространяются электромагнитные взаимодействия?
2. Существуют ли в природе колебания векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$ ? Ответ обосновать.
3. Почему электромагнитную волну называют поперечной? Что колеблется (изменяется) в этой волне?

4. Как будет направлена скорость электромагнитной волны, если известны направления колебаний векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  (рис. 46)?

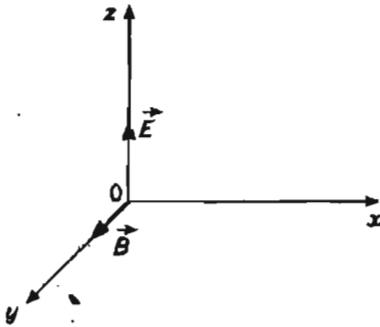


Рис. 46

### Вариант 2

1. Что такое электромагнитная волна? Дать развернутый ответ.
2. Как экспериментально доказать, что радиоприемник (рис. 43) действительно регистрирует сигналы от диполя?
3. Может ли положительно заряженная палочка, движущаяся прямолинейно и равномерно, излучать электромагнитные волны? Почему?

4. Как будет направлен вектор  $\vec{E}$ , если известны направление распространения волны  $c$  и направление колебаний  $\vec{B}$  (рис. 47)?

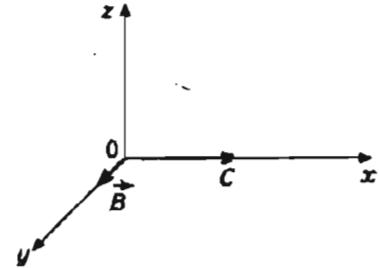


Рис. 47

### Вариант 3 (уровень В)

1. Можно ли с помощью установки, представленной на рис. 43, проверить гипотезу о затухании электромагнитной волны?
2. Докажите, что на каждом этапе трансформации колебательного контура его собственная частота возрастает (рис. 40).
3. В чем главное отличие электромагнитной волны от ее модели?
4. Почему электромагнитные волны могут распространяться в вакууме?

## 2. СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

Электромагнитное поле — сложный физический объект. Ниже последовательно рассматриваются наиболее важные его свойства и соответствующие средства их описания.

### Виды электромагнитных волн

В природе существует много различных видов электромагнитных волн. Прежде всего их различают по виду фронта волны.

**Фронтом волны** называют геометрическое место точек пространства, до которых дошла волна в дан-

ный момент времени. Фронт от точечного источника волн имеет форму сферы (рис. 48); от протяженного вибратора фронт волны может иметь вид плоскости (рис. 49).



Рис. 48

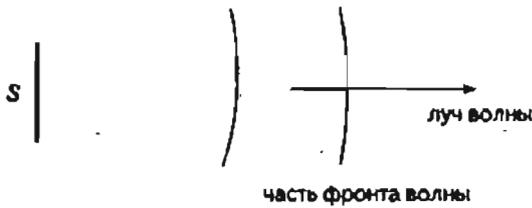


Рис. 49

Линия, перпендикулярная фронту волны в данной области, характеризует направление распространения волны. Эта линия называется **лучом**.

Воображаемую поверхность электромагнитной волны, до которой дошли колебания векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  в одной фазе, называют **волновой поверхностью**. В частности, фронт волны — всегда волновая поверхность.

Электромагнитные волны различаются **длиной волны**, т. е. расстоянием, на которое волна распространяется за период колебаний. На рис. 50 даны графики колебаний вектора  $\vec{E}$  для двух электромагнитных волн разной длины. На расстоянии длины волны фазы колебаний отличаются на  $2\pi$ . Отсюда длина электромагнитной волны определяется так:

$$\lambda = cT.$$

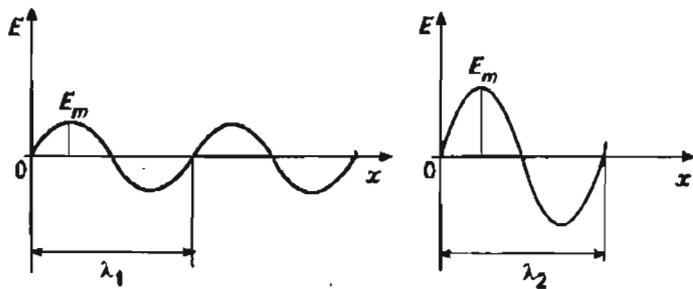


Рис. 50

Таким образом, волны бывают короткими и длинными, а значит, высокочастотными и низкочастотными. По сравнению с механическими волнами, электромагнитные волны — высокочастотные. Например в них колебания происходят с частотой порядка МГц. Частота  $\nu$ , как и длина волны, — важная характеристика электромагнитной волны.

Для скорости электромагнитных волн в вакууме Максвелл теоретически получил следующую формулу:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}.$$

Расчеты дали значение  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Скорость электромагнитных волн в веществе меньше их скорости в вакууме:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}.$$

Оказалось, что скорость электромагнитных волн удивительно совпадает со значением скорости света, экспериментально определенной задолго до этого. Данный факт позволил ученым высказать предположение (гипотезу) о единой природе света и электромагнитных волн.

В природе обычно распространяются электромагнитные волны не строго одной частоты (не монохроматические). В частности, короткий импульс электромагнитной волны может состоять из волн разной частоты (рис. 51).

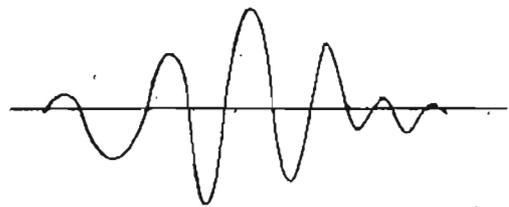


Рис. 51

### Основные свойства электромагнитной волны

Электромагнитные волны с течением времени распространяются в пространстве, причем распространяются непрерывно. Теоретически, например, это подтверждается формулой распространения колебаний вектора  $\vec{E}$ :

$$E = E_0 \cos\left(\omega t - \frac{\nu x}{c}\right).$$

Экспериментально это подтверждается приемом электромагнитной волны в близлежащих точках пространства (рис. 43).

С распространением волны изменяется положение ее фронта. В 1690 г. голландский физик Х. Гюйгенс сформулировал принцип расчета фронта волны: *каждая точка фронта волны в момент времени t, становится источником вторичных волн, огибаю-*

щая которых дает фронт волны в следующий момент времени  $t_2$  (рис. 52).

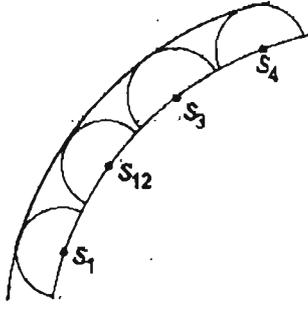


Рис. 52

Электромагнитная волна — поперечная волна (рис. 39). В ней колебания векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  происходят перпендикулярно направлению распространения. Если в электромагнитном излучении присутствуют лишь волны, вектор  $\vec{E}$  которых колеблется только в одной плоскости, то такое излучение называется **плоскополяризованным** (рис. 53). В обычном случае в излучении присутствуют волны, векторы  $\vec{E}$  которых колеблются в разных плоскостях (рис. 54). Такое излучение называется **неполяризованным**.

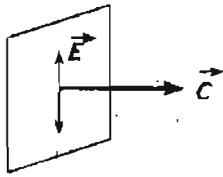


Рис. 53

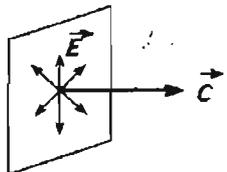


Рис. 54

Поляризация электромагнитной волны имеет значение при взаимодействии волны с веществом. Так, при отражении от вещества волна может поляризоваться.

Электромагнитные волны различаются по интенсивности. И теоретически, и экспериментально уже было доказано, что электромагнитная волна переносит энергию. Вспомним, что плотность энергии электромагнитного поля выражается формулой:

$$\varpi = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} + \frac{1}{2\mu_0 \mu B^2}.$$

Поток излучения — это полная энергия, переносимая волной через какую-либо поверхность за единицу времени:

$$\Phi = \frac{W}{t}.$$

Плотность потока излучения или интенсивность волны — это энергия волны, проходящая за единицу времени через единичную площадь, перпендикулярную лучу волны:

$$I = \frac{W}{\Delta S}.$$

Между плотностью электромагнитной энергии и плотностью потока излучения существует связь. Определим ее.

Для простоты выберем площадку в форме круга, через которую проходит волна, и расположим ее перпендикулярно лучам (рис. 55). За время  $t$  через площадку пройдет энергия, заключенная в объеме  $ctS$ , т. е. энергия  $W = \varpi ctS$ . Подставляем это выражение в формулу интенсивности волны и получаем:

$$I = \varpi c.$$

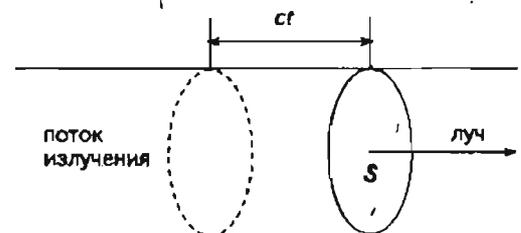
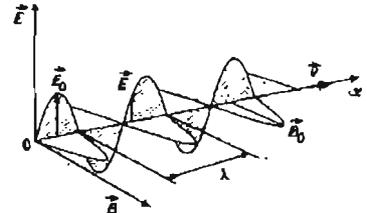


Рис. 55

Обобщение изученного материала представлено в таблице 3.

Таблица 3

Свойства электромагнитной волны	Средства описания (характеристики)
1. Распространение в пространстве	Постоянная скорость: в вакууме $3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$ в среде — меньше
2. Разные волны по виду	$c = \lambda \nu$ $\lambda(м)$ — длина волны $\nu(Гц)$ — частота колебаний Разный фронт волны (сфера, плоскость и др.)
3. Перенос энергии	$w \left( \frac{Дж}{м^3} \right)$ — плотность энергии $I \left( \frac{Вт}{м^2} \right)$ — плотность потока излучения
4. Поперечность электромагнитной волны	

*Самостоятельная работа*

1. Необходимо твердо знать ответы на следующие вопросы. В чем отличие фронта волны от волновой поверхности? Что позволяет определить принцип Гюйгенса? Изменяется ли интенсивность волны при увеличении расстояния от источника излучения? От чего зависит интенсивность электромагнитной волны? Как меняется с расстоянием интенсивность волны точечного источника излучения, если фронт волны — сфера? Как экспериментально доказать, что с расстоянием электромагнитные волны «затухают»?
2. (Уровень В.) Из теории Максвелла следует, что плотность энергии электрической составляющей электромагнитного поля и плотность энергии магнитной составляющей равны между собой. Получите из этого условия выражение для скорости электромагнитной волны в вакууме. Докажите, что действие электрической составляющей поля  $\vec{E}$  на движущийся заряд существенно больше, чем магнитной составляющей  $\vec{B}$ .  
(Подсказка: надо вспомнить выражения для силы электрического взаимодействия зарядов и силы Лоренца.)
3. В таблице 4 приведены некоторые природные явления, обусловленные существованием электромагнитных полей и волн. На основе изучения научно-популярной литературы дополните этот ряд другими явлениями.

Таблица 4

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ		
Космос	Живые организмы	Земля
Радио- и другие излучения звезд и галактик Излучения Солнца Радиационные пояса Земли	Заряды и электрические поля клетки Электрические поля рыб: скат, угорь и др. Электрорадары рыб: гимнарх Магнитные поля органов человека Электрические поля и токи в растениях	Магнитное поле Земли Ионосфера Электрические поля и грозовые разряды

### 3. ВОЛНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

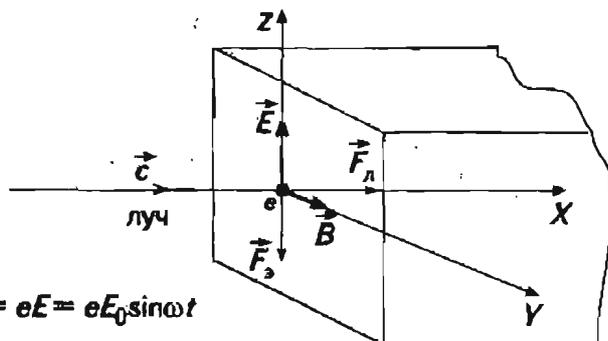
Конспект.

Таблицы. Страницы

При своем распространении электромагнитные волны взаимодействуют с веществом, что приводит к самым разным явлениям, наиболее типичные из которых рассмотрены ниже. Кроме того, в одной области пространства несколько электромагнитных волн складываются, что при определенных условиях приводит к интересным явлениям.

#### Давление электромагнитной волны

Электромагнитная волна, падающая на вещество, действует на него — оказывает давление. Рассмотрим луч волны, направленный перпендикулярно поверхности металла (рис. 56).



$$F_z = eE = eE_0 \sin \omega t$$

$$F_n = eB_0 v \sin \omega t$$

$$\Delta p = F_n \Delta t; \quad v_0 = \frac{E_0}{c}$$

$$\Delta p = eB_0 v \sin \omega t \cdot \Delta t = \frac{v}{c} eE_0 \sin \omega t \Delta t = \frac{F_z \Delta t v}{c} = \frac{\Delta \omega}{c}$$

Рис. 56

Тогда на свободный электрон действует электрическая сила по линии вектора  $\vec{E}$ , которая приводит в движение электрон по оси  $OZ$ . Но на движущийся электрон действует сила Лоренца. Согласно правилу левой руки, она направлена вдоль оси  $OX$ . Таким образом, электромагнитная волна оказывает действие на вещество, сообщает ему импульс.

#### Поглощение электромагнитных волн

Экспериментальное доказательство существования этого явления легко осуществить с помощью генератора и приемника сантиметровых волн (длина волны 3 см). На рис. 57 показана установка, которая широко используется в школе: 1 — рупорный излучатель, 2 — рупорный приемник, сигнал с которого после усиления подают на громкоговоритель или вольтметр.

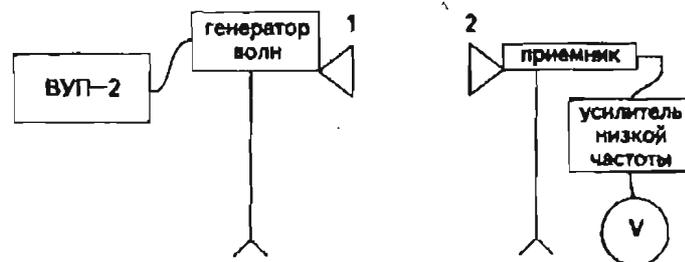


Рис. 57

Если между генератором и приемником волн поместить диэлектрик (оргстекло, парафин), то наблюдается уменьшение сигнала. Интерпретация факта однозначна: происходит поглощение электромагнитной волны веществом.

#### Отражение и преломление электромагнитных волн

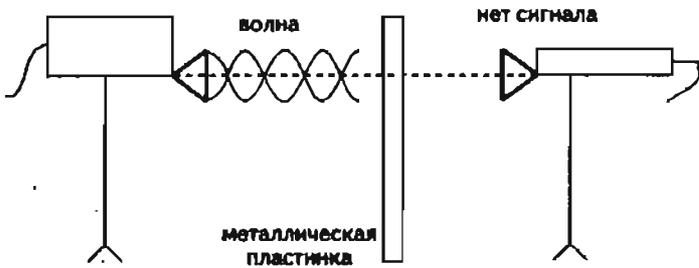
Аналогично свету (вспомним курс физики восьмого класса) электромагнитные волны при взаимодействии с веществом отражаются и преломляются.

Если на пути электромагнитной волны поставить металлическую пластину, то волна изменяет направление распространения (рис. 58). Причем выполняется закон отражения (рис. 58 б).

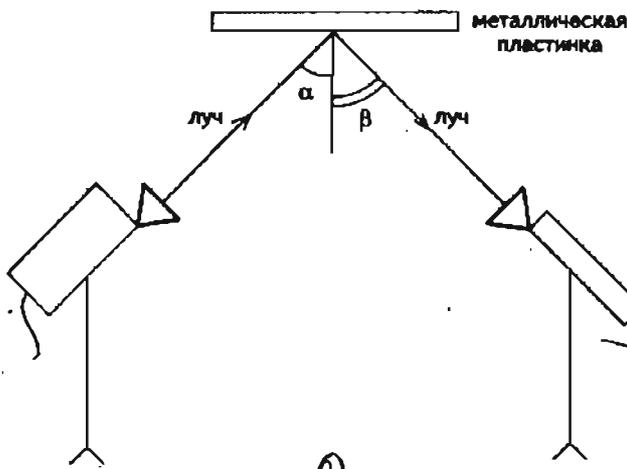
На границе раздела двух сред «воздух — диэлектрик» происходит преломление электромагнитной волны. На этом явлении основано действие линзы (2), изготовленной из диэлектрического материала (рис. 59). Для регистрации волны используется дипольный приемник (3). На рисунке показано направление распространения одного луча.

#### Интерференция электромагнитных волн

В результате экспериментального изучения распространения волн ученые выяснили, что электромагнитные волны небольшой интенсивности не взаимодействуют между собой и распространяются независимо друг от друга. Если в области пространства независимо существуют две (и более) волны соответственно с векторами  $\vec{E}_1$  и  $\vec{B}_1$ ,  $\vec{E}_2$  и  $\vec{B}_2$ , то их результирующее действие равно действию волны с векторами  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$  и  $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$ . Это правило называется **принципом суперпозиции**. Принцип суперпозиции для электромагнитных полей вытекает из теории Максвелла и имеет в физике фундаментальное значение.



а)



б)

Рис. 58

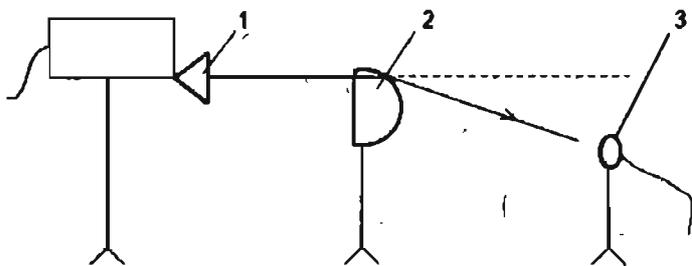


Рис. 59

во времени распределение амплитуды результирующих колебаний, т. е. четко фиксируются максимумы и минимумы. О чем это говорит? Это говорит о том, что в данной области пространства в результате сложения волн наблюдается новое физическое явление — интерференция. Но такая постоянная картина наблюдается лишь при условии согласованности (когерентности) волн. Волны должны иметь одинаковую частоту и постоянную разность фаз колебаний. Если это условие не соблюдается, то хотя сложение волн и происходит, но нет постоянного распределения амплитуды колебаний в пространстве.

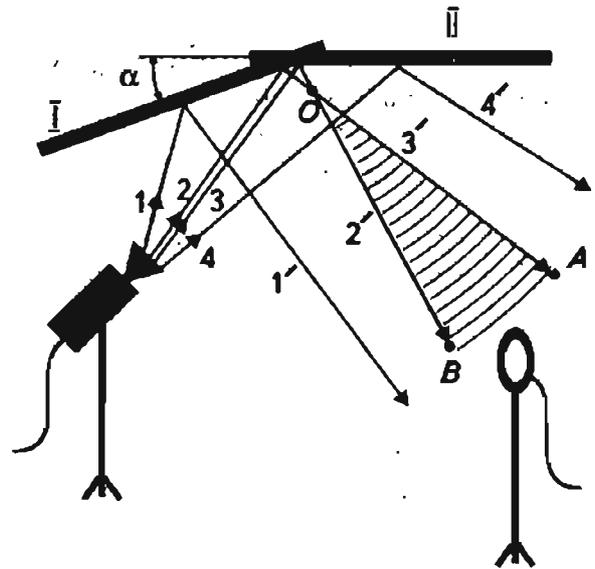


Рис. 60

Для теоретического расчета (непростого) интерференционной картины в точке A (рис. 61) надо складывать выражения для векторов  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  в данной точке:

$$E_1 = E_{10} \cos\left(\omega t + \frac{\omega r_1}{c} + \varphi_1\right),$$

$$E_2 = E_{20} \cos\left(\omega t + \frac{\omega r_2}{c} + \varphi_2\right).$$

При условии  $\vec{E}_{10} = \vec{E}_{20} = \vec{E}$  сложение дает результат:

$$E_A = 2E \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \cos(\omega t + \psi).$$

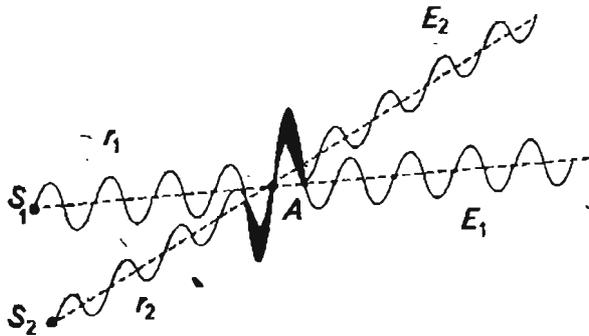
Амплитуда результирующих колебаний в произвольной точке A равна:

$$E_{A0} = 2E \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right).$$

Обычно на практике в одной области пространства распространяется несколько электромагнитных волн. Возникает задача изучения их результирующего эффекта.

Проще всего это сделать с помощью эксперимента, схема которого приведена на рис. 60. Здесь две электромагнитные волны образуются в результате отражения от металлических пластин I и II, расположенных под небольшим углом  $\alpha$ . В области OAB происходит наложение волн. С помощью приемника выясняется, что образовалось постоянное

т. е. амплитуда не зависит от времени и определяется разностью фаз  $\Delta\phi$ . Если  $\Delta\phi = 2\pi n$ , где  $n$  — целое число, то амплитуда колебаний в данной точке максимальна (рис. 61).



$$v_1 = v_2, r_1 = \text{const}, r_2 = \text{const}$$

$$E_{1A} = \text{max}, E_{2A} = \text{max}$$

Рис. 61

Изучение интерференции волн позволило французскому физику Френелю уточнить формулировку принципа Гюйгенса: *новый фронт волны образуется в результате интерференции вторичных волн.*

**Дифракция электромагнитных волн**

Если на пути распространения электромагнитной волны встречается препятствие, то наблюдается явление дифракции, т. е. огибание волной препятствия. На рис. 62 приведена схема опыта, а на рис. 63 изображено распределение интенсивности волны в зависимости от расстояния до центра щели. Напротив щели приемник четко фиксирует наличие волны, затем следует спад сигнала до нуля, потом наблюдается прием слабого сигнала. Чем объясняется наличие зоны «молчания»?

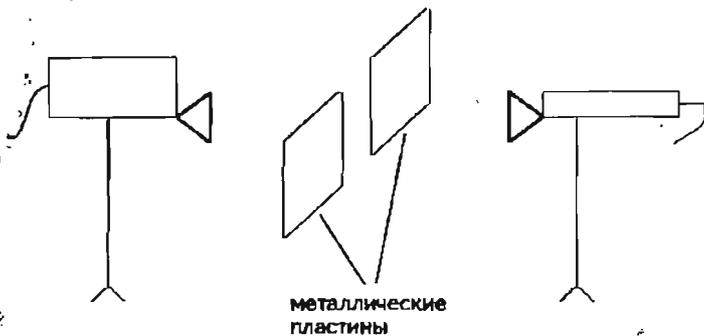


Рис. 62

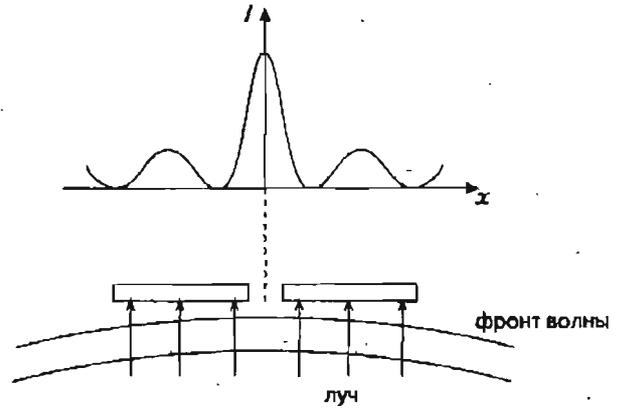


Рис. 63

Существование максимумов и минимумов интенсивности электромагнитной волны объясняется интерференцией вторичных волн. Поскольку вторичные волны когерентны (они исходят от одного источника), то и образуется устойчивая интерференционная картина.

Для простоты выберем два источника вторичных волн  $M$  и  $N$  (рис. 64). При своем распространении волны дойдут до точки  $A$  на экране. Если разность хода будет равна целому числу полуволн, то образуется минимум интенсивности волны. Заметим, что для волн иной длины в данной точке  $A$  может образоваться и максимум.

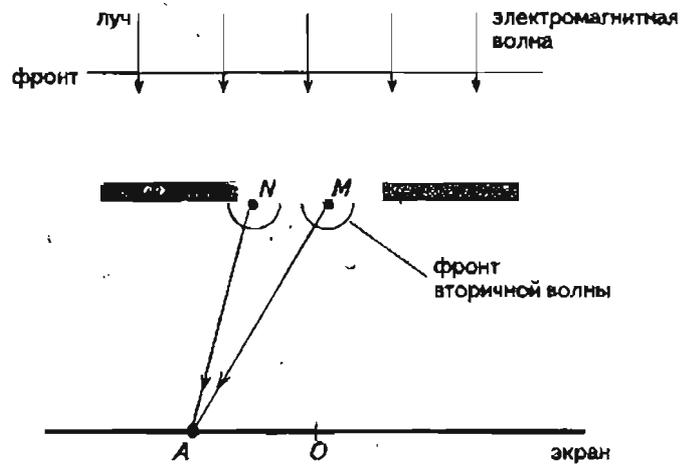


Рис. 64

**Дисперсия электромагнитных волн**

При распространении электромагнитного излучения, состоящего из волн разной длины, в веществе (диэлектрике) происходит разделение волн. Это явление получило название **дисперсии**. Причина явления заключается в различии фазовых скоростей волн разной длины в среде. В результате при

*Самостоятельная работа*

распространении излучения в среде волны разделяются, например пространственно.

Явление дисперсии разных электромагнитных волн широко используется в науке и технике для изучения свойств вещества излучателя. Соответствующий метод называется **спектральным анализом**. Подробнее дисперсия будет рассмотрена на примере световых волн.

**Явление поляризации электромагнитных волн**

Ранее было выяснено, что электромагнитные волны — поперечные. В природе неполяризованное электромагнитное излучение в результате взаимодействия с веществом может стать плоско поляризованным. Такое явление получило название **поляризации**. Экспериментально явление наблюдается на следующей установке (рис. 65).

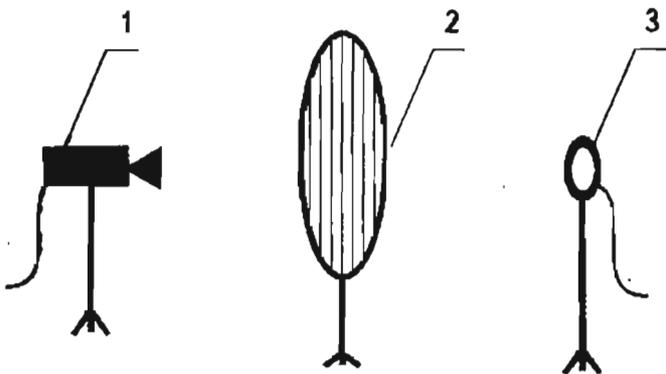


Рис. 65

Излучение от генератора (1), проходит через металлическую решетку (2) и фиксируется только вертикально расположенным дипольным приемником (3). Это говорит о том, что вектор  $\vec{E}$  совпадает с положением приемного диполя (рис. 66).

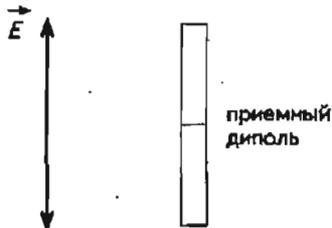


Рис. 66

Естественное электромагнитное излучение частично поляризуется при отражении от некоторых поверхностей. Такое явление находит применение в науке и технике.

1. Повторите изученную теорию по следующим вопросам. Какие явления наблюдаются в результате взаимодействия электромагнитных волн и вещества? Зависит ли взаимодействие электромагнитной волны и вещества от вида вещества? Приведите примеры для доказательства. Что такое интерференция: явление или свойство волны? По какой плоскости определяют плоскость поляризации электромагнитной волны? Могут ли продольные волны поляризоваться? Может ли происходить явление дифракции волны при отсутствии препятствий?
2. Выведите формулу для расчета импульса, который передает электромагнитная волна веществу (рис. 56). Напомним соотношения, которые надо использовать:

$$p = F_n t;$$

$$F_n = eBv \sin \omega t;$$

$$B = \frac{E}{c};$$

$$F_s = eE \sin \omega t.$$

3. Изменится ли интерференционная картина, если в область распространения волн поместить металлические и иные предметы? Выскажите предположение о возможном использовании наблюдаемого явления на практике.
4. В каком случае (рис. 67) электромагнитная волна имеет большую длину? Ответ обосновать.

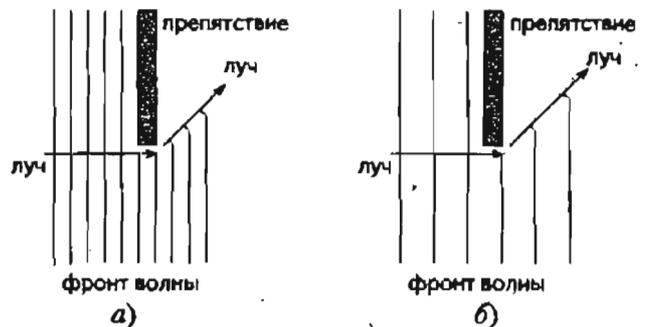


Рис. 67

5. При отражении электромагнитных волн от металлического листа в результате интерференции бегущей и отраженной волн образуется стоячая волна (рис. 68). Изображенное распределение максимумов и минимумов сохраняется во времени. Определите скорость распространения волны, если ее частота  $10^{10}$  Гц, а расстояние от излучателя до экрана известно.

Подобный эксперимент проводил Г. Герц. Он писал в 1888 г.:



«Изучая искры во вторичном проводнике на больших расстояниях от первичного, где, разумеется, искры были очень слабыми, я замечал, что во многих положениях вторичной цепи искры явно усиливаются, когда я приближался к твердой стене... Простейшим объяснением казалось мне следующее: волнообразно распространяющееся индукционное действие отражается от стен, причем отраженные волны в некоторых местах усиливают падающие, в других — ослабляют, так что благодаря интерференции обеих волн в воздухе образуются стоячие волны.»

Объясните с современной точки зрения, что такое «индукционное действие», «вторичный проводник», «первичный проводник»? Какой вид имел вибратор Герца? Какой вид имел приемный резонатор?

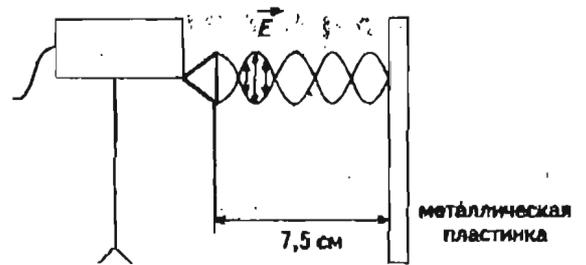


Рис. 68

*Творческие задания*

Допустим, что от источника излучения  $S$  распространяются электромагнитные волны по трем выделенным направлениям (рис. 69). На основе знания о поперечности электромагнитных волн сформулируйте идею радиопеленгации источника излучения. Какой должна быть приемная антенна у радиопеленгатора? Подготовьте доклад об использовании принципа радиопеленгации в системах автопилота современных самолетов. Небольшие подсказки: как обычно для искусственных излучателей располагается в волне вектор  $\vec{E}$ ? При каком расположении рамки относительно вектора  $\vec{B}$  в ней не возникает электрического сигнала?

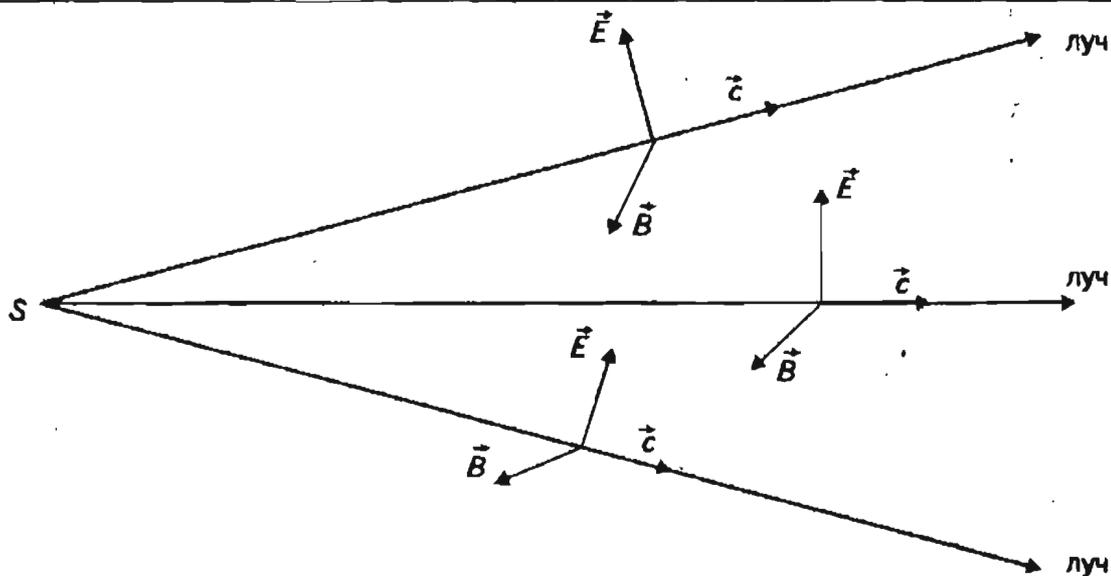


Рис. 69

## 4. ПОЛУЧЕНИЕ, ПЕРЕДАЧА И ПРИЕМ РАДИОВОЛН

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

Человек живет в океане электромагнитных волн. Его ежедневно и ежечасно окружают различные излучения. Одним из самых известных являются радиоволны. Это электромагнитные волны с длиной волны от долей миллиметра до нескольких километров. Название волн определено по их предназначению. Естественно, для радиоволн характерны все обычные свойства электромагнитных волн.

### Принципы современной радиосвязи

Получение и регистрация электромагнитных волн подтолкнули физиков и техников всего мира к поискам средств совершенствования излучателя и приемника, практического использования этих устройств. 7 мая 1895 г. русский физик и изобретатель А. С. Попов продемонстрировал достаточно удобный прибор для приема электромагнитных волн. Началась эра радио.

На рис. 70 изображена блок-схема радиосвязи. В передатчике сначала создаются электромагнитные колебания высокой частоты. Для чего это необходимо? Вспомним, что электромагнитные волны излучаются интенсивнее при большой частоте колебаний заряда.

Но просто бесконечная гармоническая волна не несет значимой информации. Поэтому возникает потребность изменения электромагнитной волны, например, для передачи звука ее модулируют с помощью звуковых колебаний. В чем заключается модуляция? В изменении амплитуды или частоты высокочастотных колебаний. При амплитудной модуляции с помощью сигнала звуковой частоты изменяют амплитуду высокочастотных колебаний.

Понятно, почему перед излучением сигнал усиливают. Без этого не может быть передачи волн на большие расстояния. Далее радиоволна распространяется обычным образом. На антенну приемника она попадает уже малой интенсивности, вот почему сигнал сначала усиливают. Затем с помощью детектора (в простейшем случае это обычный диод) выделяют сигнал низкой частоты, который несет нужную информацию — звук. Усилитель низкой частоты необходим, чтобы громкоговоритель воспроизвел звук нужной громкости.

Важно понять, что каждый блок современного передатчика или приемника радиоволн — это технически сложное устройство. При сравнительно простых физических принципах технические решения могут быть сложными и разнообразными.

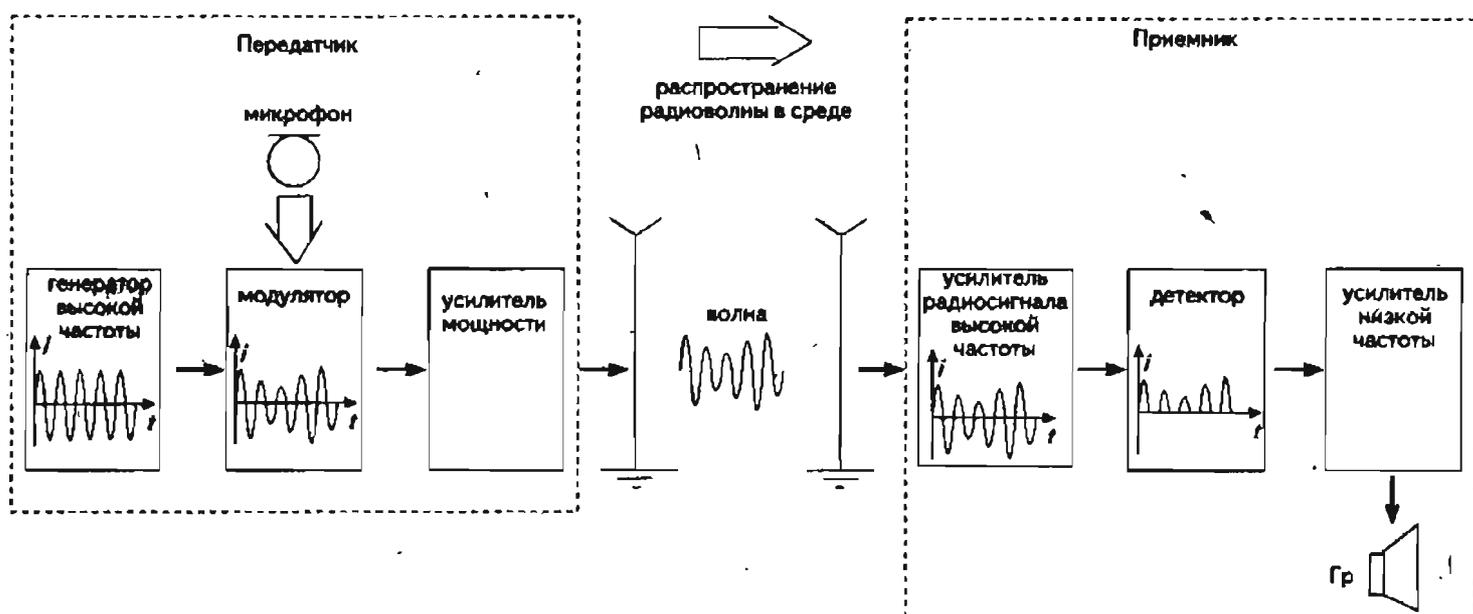


Рис. 70

Итак, перечислим принципы современной радиосвязи:

- при радиосвязи всегда происходит излучение, распространение и прием радиоволн;
- для передачи информации (текстовой, звуковой и др.) необходимо модулирование высокочастотного сигнала до его излучения и демодулирование после приема;
- на разных этапах прохождения сигнала его неоднократно усиливают.

### Подробнее о радиопередатчике

Схема простейшего излучателя приведена на рис. 71. В колебательном контуре  $LC$  с помощью обратной связи на транзисторе и источника энергии  $B$  создаются незатухающие высокочастотные колебания, амплитуда которых изменяется с помощью индуктивной связи звуковыми колебаниями. Полученный в закрытом колебательном контуре сигнал поступает (вновь с помощью индуктивной связи) на антенну, т. е. в открытый колебательный контур (рис. 72). Происходит излучение радиоволны. Лучше излучают антенны, расположенные вертикально; заземление позволяет уменьшить размер антенны в два раза.

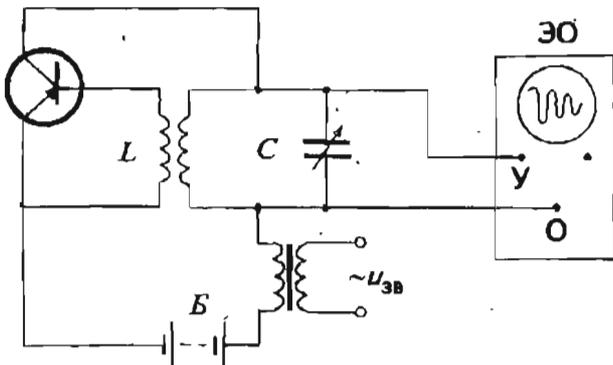


Рис. 71

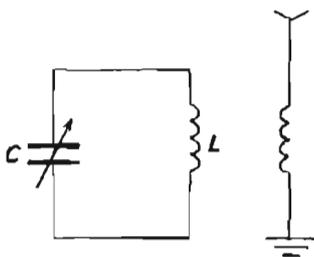


Рис. 72

### Подробнее о распространении радиоволн

Как распространяется излученная радиоволна — не второстепенный вопрос. На практике от решения этого вопроса зависит качество приема.

На распространение радиоволн влияют следующие факторы:

- физические и геометрические свойства поверхности Земли;
- наличие ионосферы, т. е. слоя ионизированного газа на высоте 100–300 км;
- искусственные сооружения или объекты (дома, самолеты и т. п.).

На рис. 73 изображены наиболее типичные варианты распространения радиоволн разного диапазона около поверхности Земли. Заметим, что при прохождении радиоволн наблюдаются и дифракция, и интерференция.

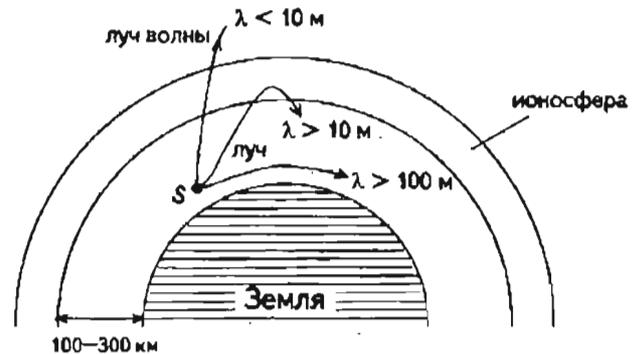


Рис. 73

### Подробнее о радиоприемнике

Схема простейшего радиоприемника приведена на рис. 74. Расшифруем ее и объясним работу отдельных элементов. Колебательный контур связан с антенной. Собственная частота колебательного контура может изменяться с помощью конденсатора переменной емкости  $C_1$ . Из всех возбужденных в антенне электромагнитных колебаний с помощью контура выделяются колебания определенной частоты. Эти колебания высокочастотные и модулированные. Но после прохождения диода  $D$  они становятся пульсирующими и имеют одно направление (рис. 75 а). Конденсатор  $C_2$  сглаживает сигнал, в результате чего получается низкочастотный сигнал, несущий звуковую информацию (рис. 75 б).

**Радиолокация**

Одним из важных практических применений радиоволн является радиолокация, т. е. обнаружение и определение местоположения объекта с помощью радиоволн. Для радиолокации создают сложные радиоэлектронные устройства — радиолокаторы. Схематическое устройство радиолокатора приведено на схеме 9. Принцип его действия заключается в прямолинейном распространении и приеме отраженных радиоволн.

Для понимания работы радиолокатора важно учесть, что сигналы излучаются в виде коротких импульсов узконаправленным пучком. При вращении антенны (что обычно и бывает) сигналы идут в разные стороны, что позволяет контролировать пространство. Для излучения нужного сигнала строят специальные антенны. В современных локаторах полученный сигнал обрабатывается с помощью компьютерных программ, что позволяет сразу сообщать расстояние до объекта, его местоположение, скорость, размеры и др.

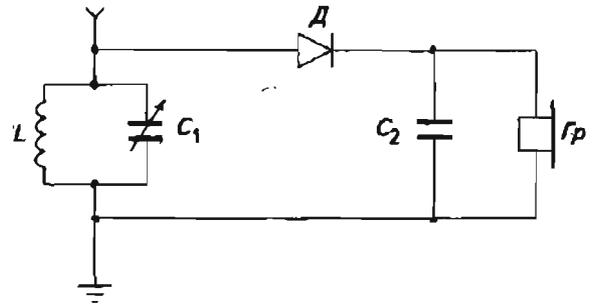


Рис. 74

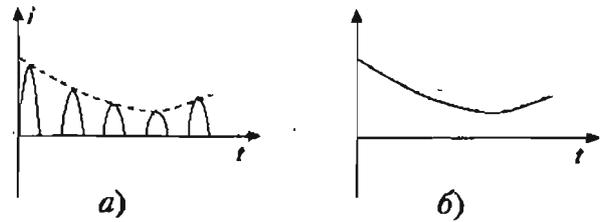
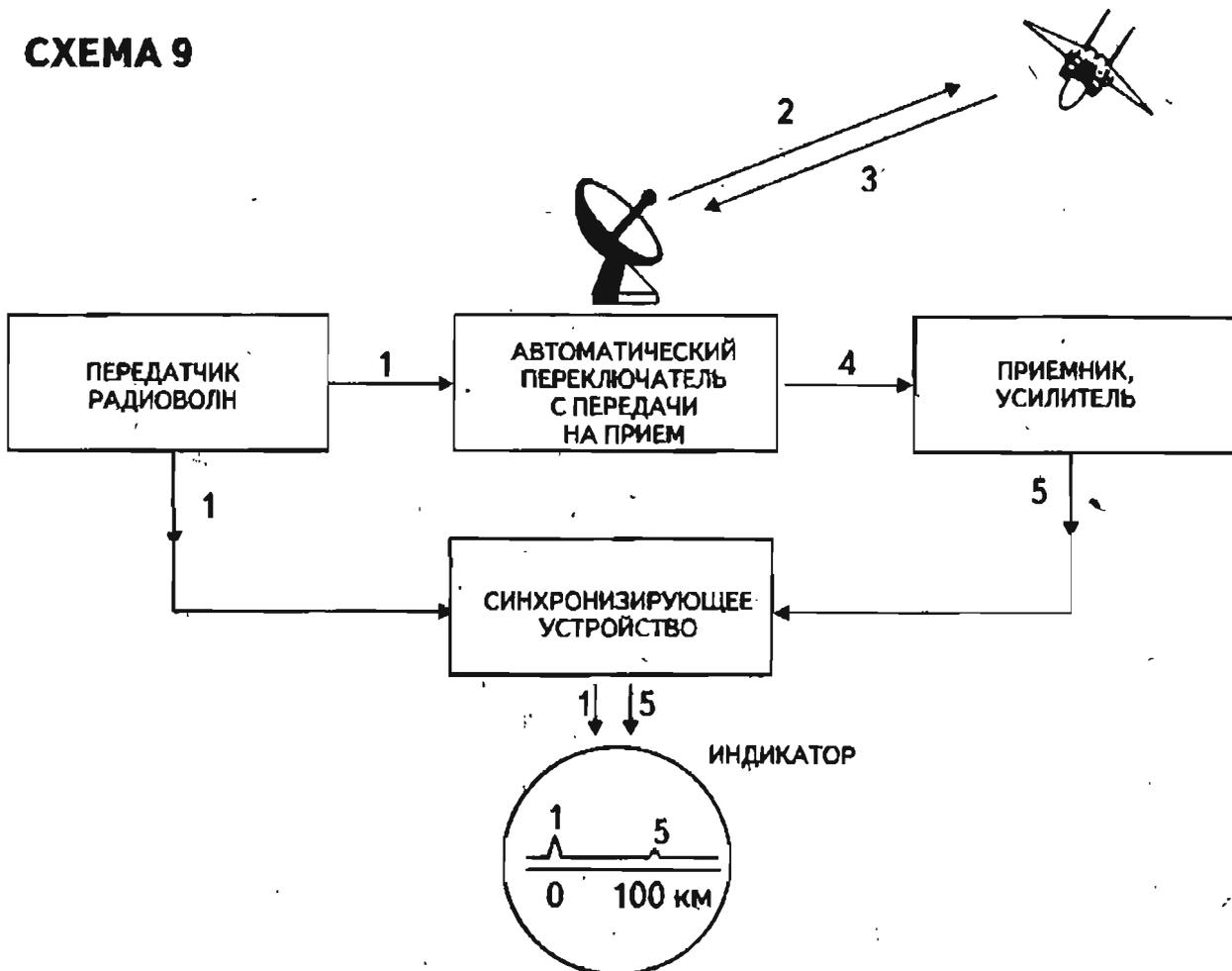


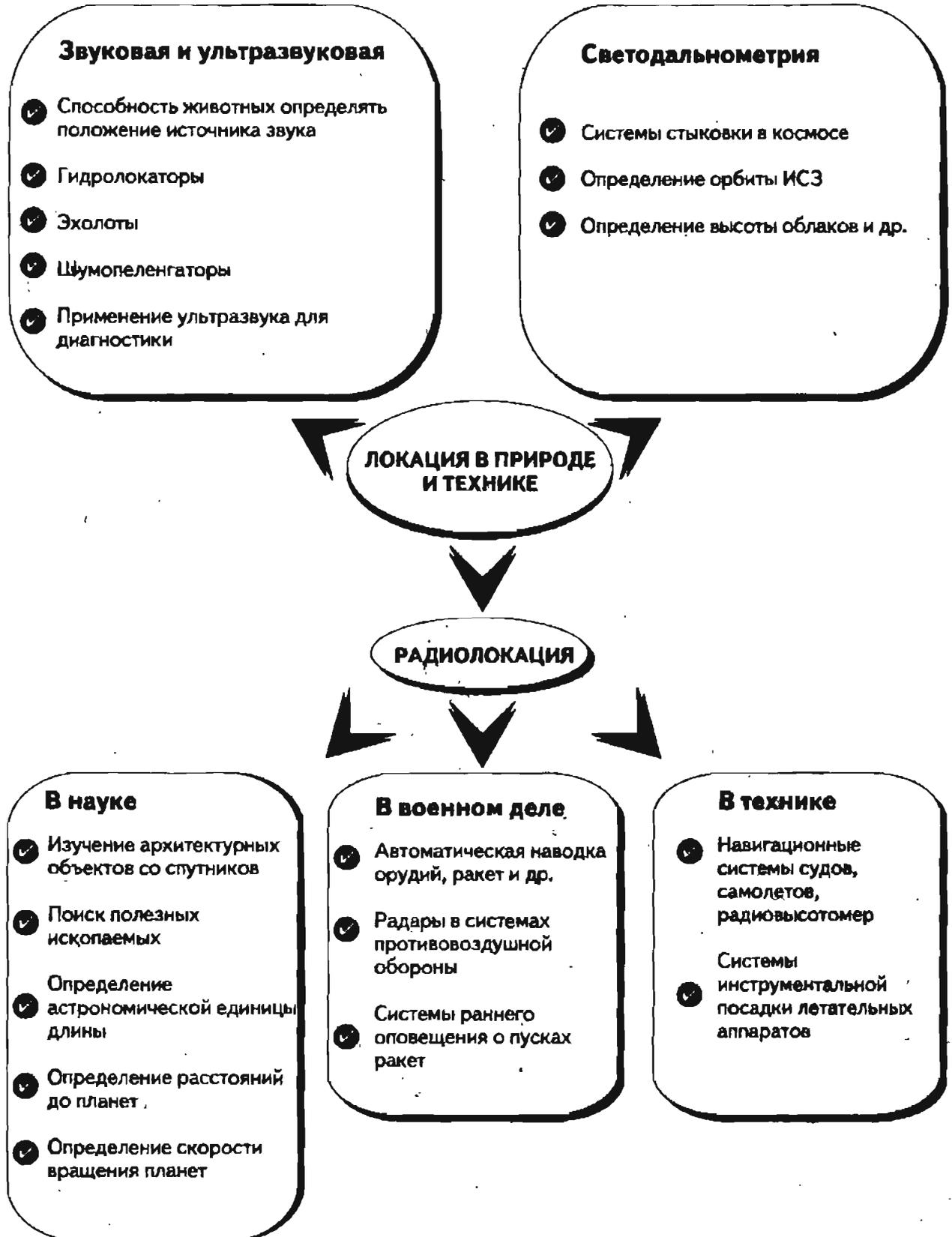
Рис. 75

Локация как метод обнаружения и изучения объектов очень широко применяется в науке и технике (схема 10).

**СХЕМА 9**



## СХЕМА 10



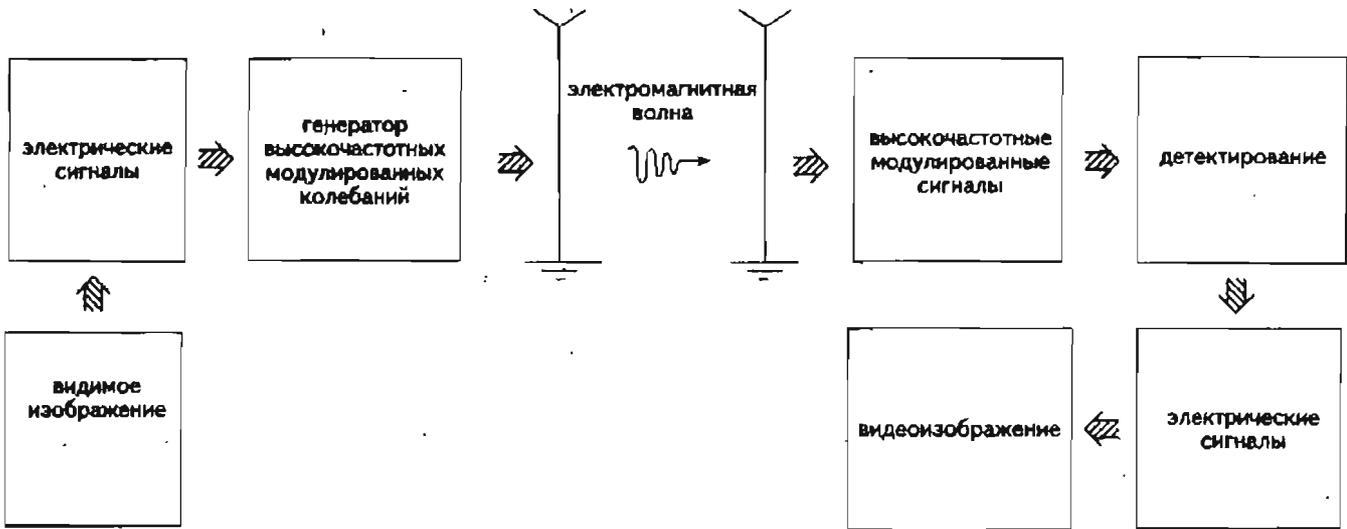


Рис. 76

**Телевидение**

Без телевизионной связи сейчас трудно представить нашу цивилизацию. Принцип осуществления такой связи представлен блок-схемой (рис. 76).

Принципиальными особенностями по сравнению с радиосвязью являются: преобразование изображения в электрические сигналы и наоборот, преобразование электрических сигналов в видеоизображение. Это происходит в специальных устройствах: в первом случае — в иконоскопе, во втором случае — в кинескопе. В современных системах цветного телевидения это сложные радиоэлектронные устройства. Подробнее об их работе можно прочитать в учебниках.

**Развитие средств связи**

Современное общество не может развиваться без обмена информацией. Связь — это передача и прием информации с помощью различных методов. Одним из самых эффективных способов является передача информации с помощью электрических сигналов, т. е. электросвязь. Структура электросвязи фактически нам известна (рис. 77). Радиосвязь — частный случай электросвязи. В случае радиосвязи канал связи — это среда передачи электромагнитных волн.

Естественным спутником передачи сигнала являются помехи. Для исключения помех и для сохранения секретности информации применяют методы кодирования сигналов. Для передачи разных сигналов-сообщений необходимы разные полосы частот, т. е. свои каналы связи. Телефонные каналы работают в пределах от 300 до 3400 Гц, каналы звукового вещания — от 30 до 15 000 Гц, телевизионного вещания — от 50 Гц до 6 МГц. В одной линии может быть несколько каналов связи.

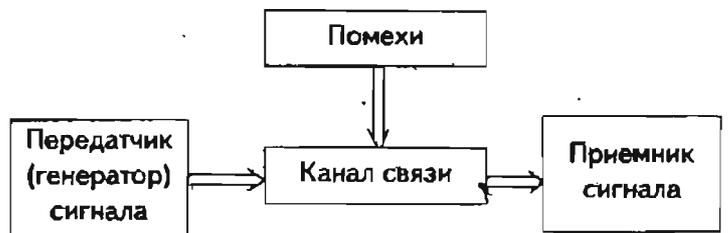


Рис. 77

На схеме 11 показаны области применения радиосвязи. Практически все они активно развиваются. Нет сомнений в том, что в XXI в. развитие всех средств связи пойдет по направлению создания единой системы электросвязи.

## СХЕМА 11

*Самостоятельная работа*

Предлагаемые задания уточняют и углубляют рассмотренные выше теоретические знания. Отработка материала необходима для формирования умений пользоваться полученными знаниями. Подойдите к этой работе аккуратно и творчески.

1. Вопросы для повторения. Почему при связи на коротких волнах существуют «зоны молчания» для приема? Почему работающая электрооборудовка создает помехи приему сигнала радиоприемником и телевизором? Будет ли работать простейший радиоприемник, если детектор включить в противоположном направлении? Одинаковые ли роли играют конденсаторы в цепи простейшего радиоприемника? Зависит ли распространение радиоволны от ее длины? Почему при радиолокации используют ультракороткие волны? Происходит ли в телевизоре детектирование получаемого радиосигнала? Почему антенну телецентра поднимают возможно выше над поверхностью Земли?

2. Определите, является ли сигнал, изображенный на рис. 78, модулированным. Если да, то какая это модуляция? Почему увеличение дальности радиосвязи с самолетом в 2 раза требует увеличения мощности передатчика в 4 раза, а для локации этого же объекта — в 16 раз?

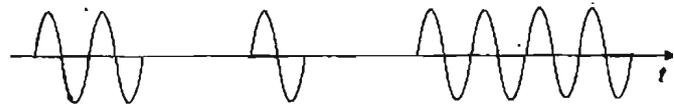


Рис. 78

3. На какой частоте работает радиопередатчик корабля, терпящего бедствие, если по международному соглашению в этом случае сигнал передается на волне длиной 600 м? Почему сигнал передается именно на данной волне?

*Контрольная работа*

Работа рассчитана на 20–25 мин.

**Вариант 1**

1. По графикам высокочастотных и звуковых колебаний (рис. 79) построить график модулирован-

ных колебаний. Где происходит такое преобразование сигнала: в передатчике или приемнике?

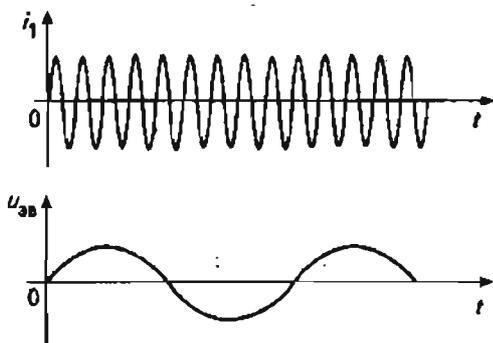


Рис. 79

2. Сигнал радиолокатора возвратился от цели через  $3,3 \cdot 10^{-4}$  с. На каком расстоянии находится цель? При решении выполнить условный рисунок.
3. Начертите схему простейшего радиоприёмника. Какую роль в цепи играет диод?

**Вариант 2**

1. Частота повторения импульса радиолокатора 1500 Гц, длительность импульса 1 мкс. Каковы наибольшее и наименьшее расстояния, на которых локатор может обнаружить цель?
2. Для каждого случая начертите недостающий вектор электромагнитной волны (рис. 80). Как должна быть расположена антенна для лучшего приема волны?

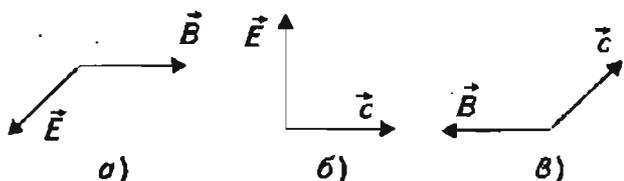


Рис. 80

3. Начертите блок-схему радиопередатчика. Охарактеризуйте излучаемую волну.

**Вариант 3 (уровень В)**

1. Радиолокатор излучает за 1 с 1000 импульсов электронного излучения длиной волны 3 см. Продолжительность одного импульса 0,3 мкс, а мощность 70 кВт. Определить энергию одного импульса, среднюю мощность станции, число длин волн в одном импульсе излучения.

2. Какова длина полуволнового вибратора (антенны), если основная его частота равна собственной частоте колебательного контура с емкостью  $10^{-10}$  Ф и индуктивностью  $10^{-6}$  Гн?
3. От каких факторов зависят пределы применимости радиолокатора?
4. Оцените, во сколько раз уменьшается плотность потока излучения радиолокатора при увеличении расстояния от 1 м до 100 км. Определите порядок усиления возвращенного сигнала. Источник излучения считать точечным.

*Творческие задания*

1. Сравните возможности передачи информации в диапазоне радиоволн длиной от 100 до 1000 м и в видимом диапазоне (см. шкалу электромагнитных волн). Ширина полосы одной радиостанции равна примерно 20 кГц.
2. Исследуйте, изменяется ли сигнал, принимаемый детекторным приемником, если последовательно закорачивать элементы электрической цепи. Что и почему происходит с сигналом? Что произойдет, если выйдет из строя конденсатор, пугнирующий телефон? (Задание выполняется в классе.)
3. Теоретически исследуйте, в чем состоят общие и особенные черты механических и электромагнитных волн. Для сравнения заполните таблицу по следующим характеристикам: источник волн, диапазон длин волн, скорость распространения, наличие среды и ее вид, колеблющийся объект, механизм передачи колебаний, вид волны.
4. Исследуйте особенности приема электромагнитных волн вашим телевизором. Для этого найдите ответы на вопросы: какой диапазон длин волн принимает телевизор? Сколько каналов он может принимать? Наблюдается ли прием сигнала при отсутствии антенны? Почему наружную антенну предпочитают комнатной, даже если передающая станция находится рядом? Влияет ли на качество приема положение комнатной антенны? Почему в панельных домах прием телевизионного сигнала на комнатную антенну менее устойчив?



# Свет как электромагнитная волна

## Изучив эту тему,

- ♦ вы узнаете, что свет обладает всеми свойствами электромагнитных волн;
- ♦ поймете, как объясняются законы распространения света, явления интерференции, дифракции и дисперсии света;
- ♦ научитесь исследовать волновые свойства света на простых опытах

## Основные понятия:

- Свет ♦ Оптика ♦ Корпускулярная модель ♦ Волновая модель ♦ Отражение света ♦ Преломление света ♦ Показатель преломления ♦ Дисперсия света ♦ Спектральный анализ ♦ Интерференция света ♦ Дифракция света ♦ Поляризация света ♦ Цвет тела

## 1. РАЗВИТИЕ ВЗГЛЯДОВ НА ПРИРОДУ СВЕТА

*Конспект.  
Таблицы. Схемы*

Теоретическое доказательство Максвеллом гипотезы о том, что свет — электромагнитная волна, относят к великим открытиям в физике. И это понятно, ведь было установлено единство многих явлений, были объяснены известные и предсказаны новые физические явления. О вкладе учения о

свете в развитие физики хорошо сказал академик С. И. Вавилов:

«Все содержание физики, в конце концов, сосредоточено в трех основных разделах: в учении о веществе, учении о силовых полях и учении о свете как важном частном случае предыдущего.»

Свет — это электромагнитные волны с диапазоном частот от  $4,0 \cdot 10^{14}$  до  $7,5 \cdot 10^{14}$  Гц. Такие волны вызваны колебаниями очень высокой частоты. Вибраторами в этом случае служат атомы вещества.

## Самый «информационный» объект изучения

Свет и световые явления люди начали изучать задолго до открытия электромагнитных волн. И это не случайно. В жизни людей свет играл и играет существенную роль: солнечная энергия, основа всего живого на нашей планете, приходит к нам вместе со светом; большую часть информации об окружающих явлениях человек получает с помощью света. Такие известные философы древности как Пифагор (VI в. до н.э.), Аристотель (IV в. до н.э.), Евклид (III в. до н.э.) занимались изучением света. В частности, Евклид в своих трактатах обобщил ранее известные знания и изложил два закона геометрической оптики: прямолинейного распространения и отражения света.

Что же такое «свет»? Этот вопрос волновал людей с глубокой древности. Свет как физический объект, с одной стороны, присутствует везде и всюду, с другой стороны, неуловим. Его трудно выделить для изучения, потому что наше восприятие объектов природы происходит как раз с помощью света. Но ученые с давних времен задавались вопросом о природе света.

По-видимому, Пифагор одним из первых выдвинул гипотезу о том, что тела испускают мельчайшие частицы, которые попадают в глаз, благодаря чему мы и видим окружающие нас тела. Много позднее И. Ньютон (1643–1727) усовершенствовал корпускулярную модель света. Согласно этой модели, свет испускается телами в виде потока мельчайших частиц – корпускул, далее они движутся прямолинейно по инерции. Корпускулярная модель света объясняла, например, отражение света от зеркала аналогично отражению шарика при упругом ударе о плоскость. Но Ньютону не удалось с помощью своей теоретической модели объяснить все известные тогда явления, например, независимое распространение света от двух источников. Действительно, почему частицы-корпускулы от одного источника не действуют на частицы-корпускулы другого источника в том случае, когда свет от этих источников пересекается в пространстве?

По-видимому, одним из первых гипотезу о свете как возбуждении среды выдвинул древнегреческий ученый Аристотель. Форму теории о световых волнах эта гипотеза приобрела в трудах голландского

физика Х. Гюйгенса (1629–1685), английского физика Т. Юнга (1773–1829), французского физика О. Френеля (1788–1827).

В своем трактате о свете Гюйгенс так писал в 1690 г. о методе познания:



«... в данном случае принципы подтверждаются при помощи получаемых из них выводов. Природа изучаемого вопроса не позволяет, чтобы это происходило иначе. Все же при этом можно достигнуть такой степени правдоподобия, которая вовсе не уступает полной очевидности. Это случается именно тогда, когда вещи, доказанные с помощью этих предполагаемых принципов, совершенно согласуются с явлениями, обнаруживаемыми на опыте, особенно когда таких опытов много и, что еще важнее, главным об-

разом, когда открываются и предвидятся новые явления, вытекающие из применяемых гипотез».

Используется ли сейчас в науке описанный метод познания? В чем, по мнению Гюйгенса, проявляется эвристическая сила гипотез? С каким из высказываний с современной точки зрения нельзя согласиться?

Модель света в этой теории такова: *свет — это волны, которые распространяются в особой среде — эфире, заполняющем все пространство.* К началу XIX в. на основе этой теории ученым удалось объяснить все наблюдаемые явления. Максвелл, теоретически доказав электромагнитную природу света, придал фундаментальный характер волновой модели света. После экспериментов Герца с электромагнитными волнами, опытов Лебедева по измерению давления света, рассчитанному на основе волновых представлений, сомнений в волновой природе света не осталось. Нет экспериментальных и теоретических оснований изменять эту точку зрения и сейчас.

Но в познании природы не все так просто. В начале XX в. при изучении явлений на микроуровне ученые вновь обратились к гипотезе о корпускулярной природе света. Свет излучается атомами в виде частиц-квантов, распространяется по законам волн, поглощается веществом как поток частиц. В современной физике корпускулярные и волновые

## СХЕМА 12



представления (модели) о свете согласованы между собой. Свет — сложный физический объект, для объяснения которого нужны разные представления.

В настоящее время знания о свете широки и разнообразны — ученые научились «смотреть» на свет с разных сторон, проникли в природу этого удивительного физического объекта. Оптика — очень развитая часть физики. Она состоит из нескольких разделов (схема 12).

## 2. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА КАК ЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ ВОЛНОВОЙ ОПТИКИ

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

После открытия электромагнитной природы света выяснилось, что представления геометрической оптики являются частным случаем представлений волновой оптики. Геометрическая оптика во многих случаях хорошо описывает распространение световых волн на геометрическом языке, прежде всего опираясь на понятие светового луча.

### Объекты изучения и основные понятия

Природный объект, который излучает световые волны, называют источником света.

Геометрическая оптика рассматривает свет и объясняет некоторые световые явления на «языке» светового луча, фотометрия изучает свет с точки зрения переноса энергии и ее восприятия человеком. Волновая оптика, выяснив электромагнитную природу света, объясняет большинство наблюдаемых явлений. Но в выяснении природы света квантовая оптика идет дальше: на микроуровне свет представляет собой поток частиц, хотя и необычных, но все же частиц. И, таким образом, в квантовой оптике удается глубже описать некоторые свойства света и световые явления. По-видимому, впереди новые открытия в мире света.

*Самостоятельная работа*

1. На основе изучения литературных источников выясните, какие факты мог использовать Ньютон для выдвижения гипотезы о корпускулярной природе света. Какие факты использовал Гюйгенс при выдвижении гипотезы о волновой природе света?
2. Чем отличается гипотеза от теории? Чем отличается модель от самого объекта? Для чего ученые выдвигают гипотезы, строят модели? Как отделить «хорошую» модель от «плохой»?

Различают естественные и искусственные источники света. Первые сами излучают свет, это например Солнце, звезды, лампочка и т. п. Вторые лишь отражают свет. Большинство тел, которые мы видим, отражают солнечный свет. Это дома, деревья, картина, книга и т. п. Все источники света — протяженные объекты. Простейшей моделью источника света является точечный источник света. Любой данный источник света можно описать точечным источником, если его размеры малы по сравнению с расстоянием, на котором рассматривается световая волна. На рис. 81 в первом случае источник света можно смоделировать точечным источником, во втором — нельзя.

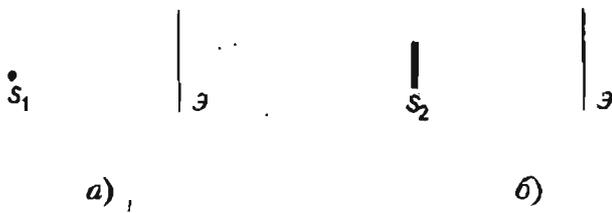


Рис. 81

Световая волна от разных источников света может иметь разный вид. Волна от точечных источников имеет сферический вид, причем на значительных расстояниях фронт волны на небольшом участке близок к прямой линии (рис. 82).

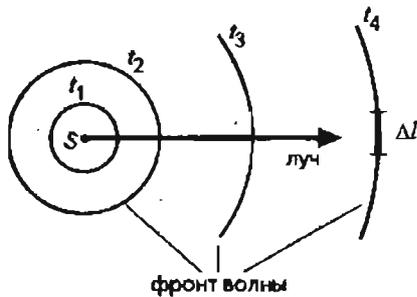


Рис. 82

Часть световой волны, выделенную мысленно или реально, называют **световым пучком**. На рис. 83 световой пучок выделен с помощью диафрагмы; при изображении световой пучок ограничен двумя лучами. В геометрической оптике прямолинейное распространение светового пучка позволяет описать его с помощью одного светового луча. Световой луч при определенных условиях оказывается хорошей моделью светового пучка. Если световой пучок сильно расходится (рис. 84), то его уже нельзя описать одним световым лучом.

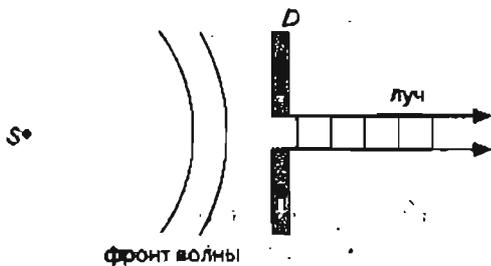


Рис. 83

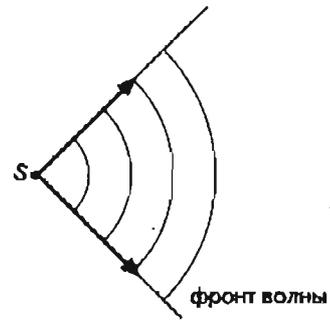


Рис. 84

В таблице 5 систематизированы объекты изучения и их модели.

Таблица 5

Объекты	Модели
Источник света S	Точечный источник света
Световой пучок	Световой луч
Среда распространения света	Однородная среда

### Законы распространения света

С давних пор на основе экспериментальных фактов был сформулирован закон прямолинейного распространения узкого светового пучка: *из одной точки в другую такой пучок распространяется по прямой линии*, т. е. его распространение можно описать световым лучом. С точки зрения волновых представлений вид светового пучка после диафрагмы (рис. 82) получается в результате интерференции вторичных волн, а в области тени вторичные волны просто гасят друг друга.

Важнейшей характеристикой распространения световой волны является ее скорость. Впервые скорость света сумел измерить в 1676 г. датский физик Рёмер. Его метод заключался в измерении времени выхода спутника Юпитера из тени (рис. 85). При втором измерении по сравнению с первым обнаружилось запаздывание выхода спутника из тени на целых 22 минуты. Единственной простой гипотезой, объясняющей этот факт, было предположение о том, что на прохождение дополнительного расстояния AB свету потребовалось дополнительное время в 22 минуты.

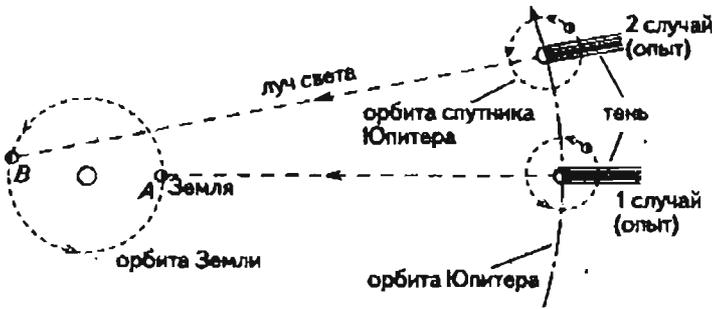


Рис. 85

При расчетах Рёмер получил значение:  $c \approx 2,27 \cdot 10^8 \frac{M}{c}$ .

Конечно, этот результат оказался не совсем точным. Но главное, опыт доказал, что свет имеет вполне конечную скорость распространения. Это было великое открытие в физике!

В геометрической оптике явление отражения света от поверхности описывает закон отражения (рис. 86). Но он также может быть получен на основе волновых представлений, в частности, на основе принципа Гюйгенса (рис. 87). Пусть фронт плоской волны дошел до участка  $AB$ , лучи  $A_1$  и  $B_1$  определяют направление света.

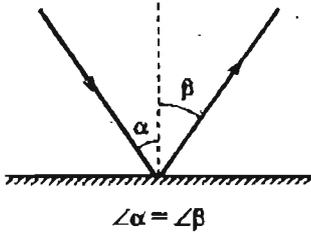


Рис. 86

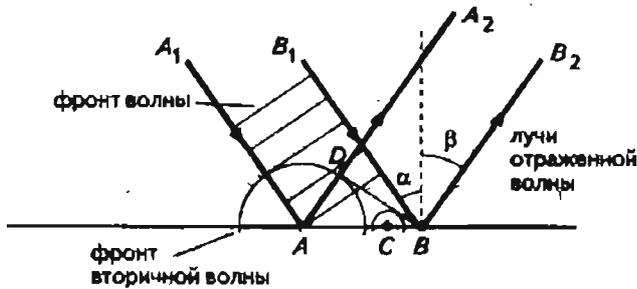


Рис. 87

Точки  $A, C, B$ , до которых дошел фронт волны, становятся источниками вторичных волн. Причем до точки  $A$  фронт падающей волны дошел раньше, она раньше стала источником вторичных волн. Огибающая вторичных волн получилась в виде прямой

линии  $BD$ , а перпендикуляры к ней  $DA_2$  и  $BB_2$  дают направление распространения волны после отражения. Из геометрических соображений легко доказать, что угол падения равен углу отражения.

Если свет падает на границу раздела двух оптических прозрачных сред, то наблюдается явление преломления света (рис. 88). Экспериментально закон преломления света был открыт в XVII в. голландским ученым Снеллиусом (рис. 88). На основе волновых представлений он легко выводится теоретически (рис. 89).

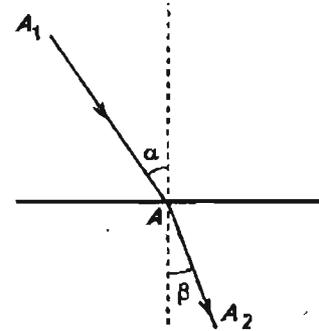


Рис. 88

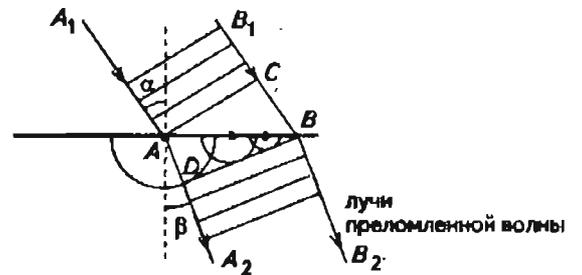


Рис. 89

Вторичная волна от точки  $A$  появится раньше, чем от точки  $B$ , на время  $\Delta t = \frac{CB}{v_1}$ . Ее фронт будет иметь

радиус  $AD = v_2 \Delta t$ . Огибающая вторичных волн  $BD$  даст фронт преломленной волны, а перпендикуляры к ней дадут направления световых лучей. Для получения формулы закона преломления следует учесть, что:

$$CB = v_1 \Delta t = AB \sin \alpha,$$

$$AD = v_2 \Delta t = AB \sin \beta.$$

Почленное деление выражений дает уравнение закона преломления (выполните это действие). Постоянная величина  $n$  характеризует оптические свойства второй среды относительно первой и на-

зывается **относительным показателем преломления**, т. е.

$$n = \frac{v_1}{v_2}$$

Показатель преломления среды относительно вакуума называется **абсолютным показателем преломления**, т. е.  $n_1 = \frac{c}{v_1}$  и  $n_2 = \frac{c}{v_2}$  и, таким образом,

$n = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$ . Среда с большим показателем преломления называется оптически более плотной, в ней скорость света меньше. Например, скорость света в алмазе в 2,42 раза меньше, чем в вакууме.

Если свет идет из оптически более плотной среды в менее плотную, например из стекла в воздух, то он частично отражается, а частично преломляется (рис. 90).

При увеличении угла падения  $\alpha$  растет угол  $\gamma$ , и при некотором  $\alpha_1$  угол преломления становится

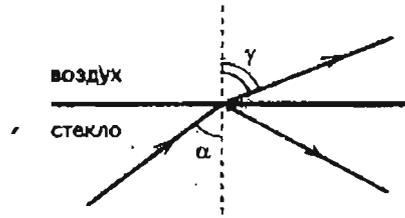


Рис. 90

равным  $90^\circ$ . Таким образом, свет не выходит во вторую среду, а остается только в первой. Такое явление называется **полным отражением света**. Это явление фактически идеального отражения обусловлено особенностями преломления света при переходе из оптически более плотной среды в менее плотную. Угол, при котором наблюдается полное отражение, легко рассчитать из условия:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}$$

### 3. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

*Конспект.  
Таблицы. Схемы*

#### Дисперсия света

Что такое свет? На этот вопрос ученые постепенно давали все более точный ответ. В 1666 г. великий И. Ньютон проделал простой, но гениальный опыт. На трехгранную призму он направил узкий световой пучок, в итоге на экране получилось световое пятно из семи цветов: фиолетового, синего, голубого, зеленого, желтого, оранжевого и красного (рис. 91). Волна одного цвета получила название **монохроматической**.

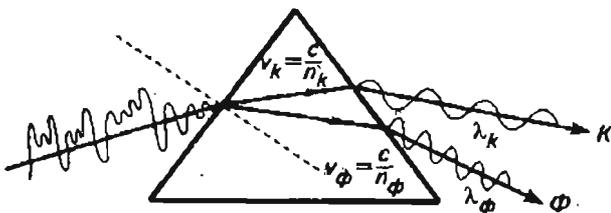


Рис. 91

Гениальный английский физик Исаак Ньютон (1643–1727) внес большой вклад в развитие опти-

ки: открыл сложное строение белого света, интерференционные кольца и др. В своей знаменитой работе «Оптика» он писал:



«Прозрачные вещества, такие как стекло, вода, воздух и пр., если их сделать очень тонкими выдуванием в пузыри или изготовляя иным способом в виде пластинок, обнаруживают различные цвета соответственно их различной тонкости, хотя при больших толщинах они кажутся очень ясными и бесцветными».

О каком явлении идет речь? Почему на толстых пленках (пластинах) явление не наблюдается?

Основной вывод из экспериментов был такой: **белый свет как электромагнитная волна имеет сложное строение — состоит из семи монохроматических волн**. Цветную картину на экране Ньютон назвал **спектром**. Второй вывод сам Ньютон сфор-

мулировал так: *световые пучки, отличающиеся по цвету, отличаются по степени преломляемости.*

Явление разложения белого света на цвета, т. е. в спектр, получило название **дисперсии**. Какова же природа этого явления? Очевидно, что разложение света в спектр происходит в результате действия вещества на свет. Вспомним, что показатель преломления вещества  $n$  определяется по формуле:

$$n = \frac{c}{v}$$

Если свет разного цвета преломляется по-разному, что следует из опыта, то, значит, скорость монохроматических волн в веществе различна. Т. е. для каждой монохроматической волны существует свой показатель преломления. Чем же отличаются монохроматические волны друг от друга? Они отличаются частотой колебаний (и, соответственно, длиной волны). Например, для красного цвета  $\lambda = 4 \cdot 10^{-7}$  м, для фиолетового —  $\lambda = 7 \cdot 10^{-7}$  м. Итак, *дисперсия света состоит в зависимости показателя преломления вещества  $n$  от частоты света  $\nu$ .*

Что же происходит на границе раздела двух сред? При переходе белого света в стекло скачкообразно изменяется скорость света, причем для волн разных частот по-разному. Одновременно также изменяется и длина каждой волны. Но частота колебаний монохроматических волн остается постоянной. Разная скорость распространения монохроматических волн в веществе приводит к разному их преломлению на границе раздела сред (рис. 92).

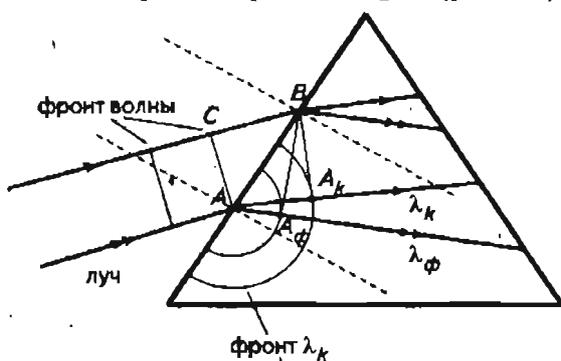


Рис. 92

Пусть для примера на призму падает световой поток из волн красного и фиолетового цвета. Сначала фронт волн дойдет до точки А. Далее вторичные волны красного и фиолетового цвета будут распространяться с разной скоростью. За время  $t$ , кото-

рое потребуется свету, чтобы пройти расстояние СВ, фронт вторичных волн в призме уйдет из точки А на разное расстояние. Естественно, огибающие вторичных волн будут разными:  $BA_k$  и  $BA_\phi$ , и лучи волн разного цвета, пойдут в разных направлениях. Это означает, что показатель преломления зависит от частоты света.

Явление дисперсии широко используется в науке и технике для получения спектров веществ, с помощью которых исследуют состав веществ и другие их свойства. **Спектральный анализ** — очень точный метод изучения вещества. Суть метода в следующем:

- изучаемое вещество нагревают до состояния, в котором оно излучает свет;
- с помощью специального прибора — спектроסקопа — получают спектр (рис. 93);
- полученный спектр изучают — сравнивают с эталонными спектрами (а их целые таблицы).

Основной частью простейшего спектроסקопа является призма.

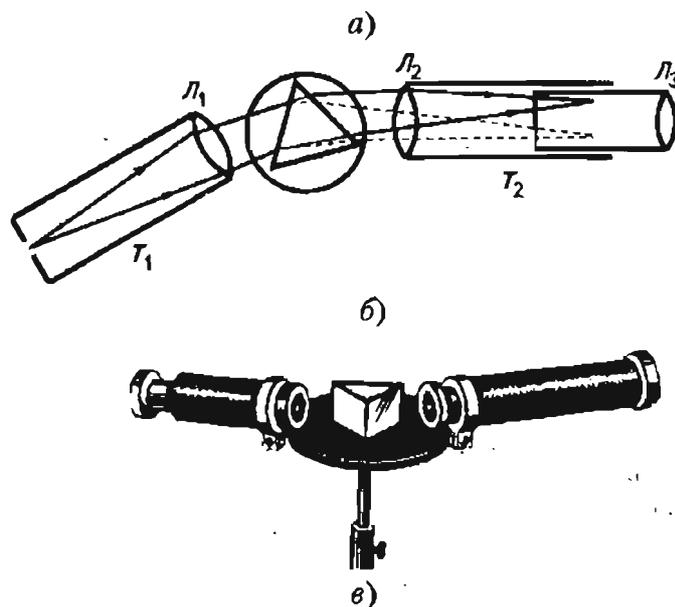
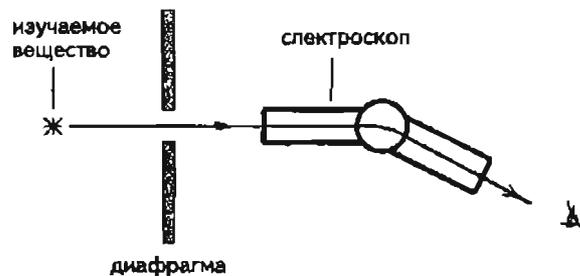


Рис. 93

## Интерференция света

В пространстве обычно независимо друг от друга распространяется много световых волн от разных источников. В тех областях, в которых они пересекаются, волны складываются. Сложение волн подчиняется принципу суперпозиции. Например, результирующий вектор  $\vec{E}$  от сложения двух волн с  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  равен:  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ . Если при этом образуется постоянное по времени распределение амплитуды колебаний, то такое явление называют **интерференцией**.

Итак, на основе экспериментов выделяют следующие свойства явления интерференции:

- а) сложение двух или более волн;
- б) образование устойчивой картины распределения максимумов и минимумов колебаний;
- в) в случае белого света в области максимумов происходит образование спектра.

Постоянная картина сложения двух световых волн образуется лишь при условии их **когерентности** — одинаковости частоты колебаний при постоянной разности фаз колебаний. Проще всего получить такие волны методом деления одной волны. Так происходит например в тонкой пленке (рис. 94). Такую пленку образуют масло или нефть на поверхности воды, мыльные пузыри.

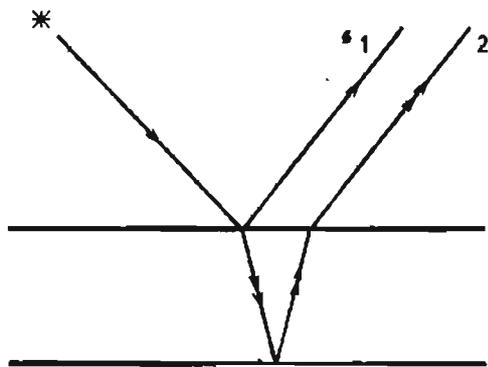


Рис. 94

На рис. 94 лучи показывают лишь направление распространения фронта волны. В области 1–2 световые волны обязательно пересекаются. И наблюдается интерференция.

Как охарактеризовать интерференционную картину? Какие средства описания этого явления нам известны?

Прежде всего, сравнительно просто определить условия образования максимумов и минимумов (рис. 95). Если в точку  $M$  приходят волны с разностью хода  $\Delta d$ , равной  $k\lambda$ , и максимальной амплитудой, то образуется максимум (рис. 96, а). Если волны приходят в противофазе, что получается при условии  $\Delta d = \frac{(2k+1)\lambda}{2}$ , то образуется минимум (рис. 96, б).

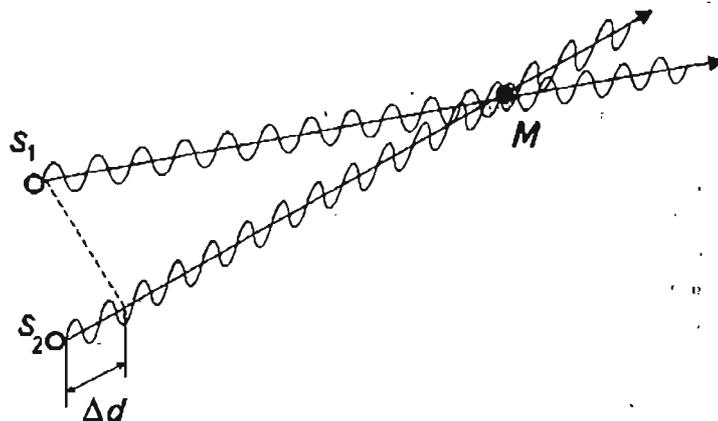


Рис. 95

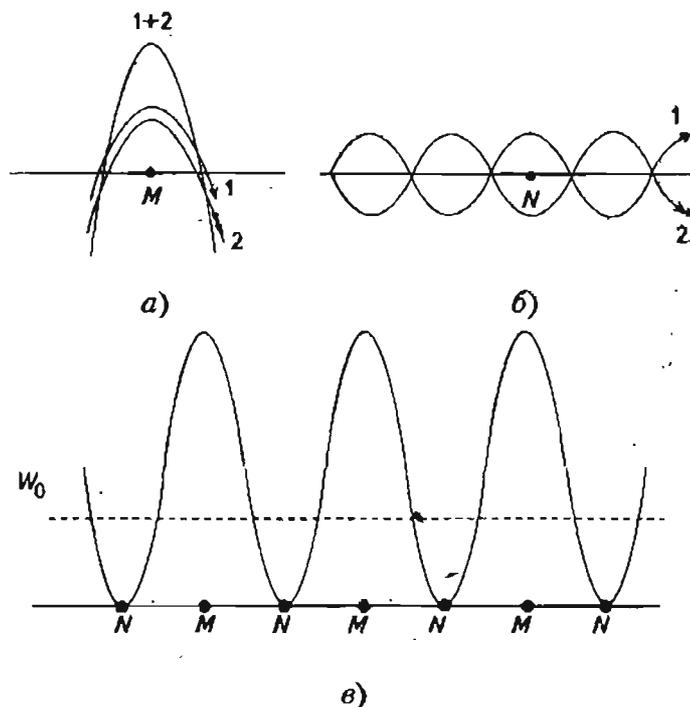


Рис. 96

В области интерференционной картины происходит перераспределение энергии, которую несут волны: в области минимумов энергия не поступает, в максимумах энергия концентрируется. Вспомним, что  $W \sim E^2$ , а при сложении в максимуме амплитуда колебания получается равной  $2E$ , т. е. энергия возрастает в 4 раза (рис. 96, в).

### Дифракция света

Свет как волна при своем распространении огибает препятствия, т. е. происходит дифракция. Явление хорошо наблюдается, если размеры препятствия сравнимы с длиной волны света. Очевидно, что это должны быть очень маленькие объекты — щели, тонкие нити и т. п. Но в принципе дифракция света происходит на любых объектах — просто ее обнаружить в этом случае бывает труднее.

В 1802 г. английский физик Томас Юнг поставил опыт, в котором на экране наблюдалась интерференционная картина (рис. 97). Но эксперимент фактически доказывал существование явления дифракции света. Определите по рисунку:

- в какой области происходит интерференция волн;
- как получены две когерентных волны;
- что изменится в картине на экране, если закрыть щель  $C$ , и что это доказывает?

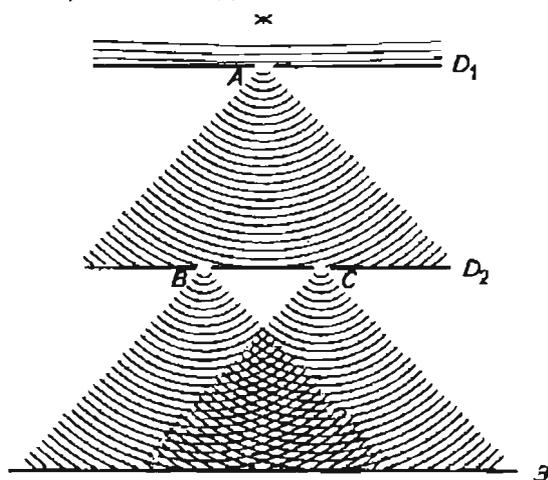


Рис. 97

Один из основателей волновой оптики английский физик Томас Юнг (1773–1829) в одной из работ писал:



«Хотя изобретение правдоподобных гипотез, независимых от каких-либо экспериментальных наблюдений, может принести очень мало пользы для развития естествознания, тем не менее, открытие простых и единых принципов, с помощью которых большое число разнородных явлений сводится к согласованным и универсальным законам, должно всегда считаться имеющим большое значение для усовершенствования человеческого разума; и чем больше и больше явлений оказываются согласующимися с принципами, заложенными в основу, тем более эти принципы могут претендовать на замену звания «гипотеза» званием «фундаментальный закон природы».

Как вы думаете, о каком принципе шла речь? Получил ли этот принцип с точки зрения современной физики статус закона природы?

В 1816–1818 гг. теорию дифракции разработал французский физик Огюстен Френель. Он дополнил принцип Гюйгенса: *волновая поверхность в любой момент времени представляет собой не просто огибающую вторичных волн, а результат интерференции вторичных волн.* Уточненный принцип Гюйгенса-Френеля позволил рассчитывать дифракционные картины в разных случаях. На рис. 98 показана схема дифракции света на щели.

В точке  $B$  происходит сложение вторичных волн от источников  $A_1, A_2, A_3, A_4$ , причем разность хода лучей между ними отличается на  $\frac{\lambda}{2}$ . В результате сложения получается минимум. Для точки  $O$  нет разности хода вторичных волн, поэтому в ней наблюдается максимум.

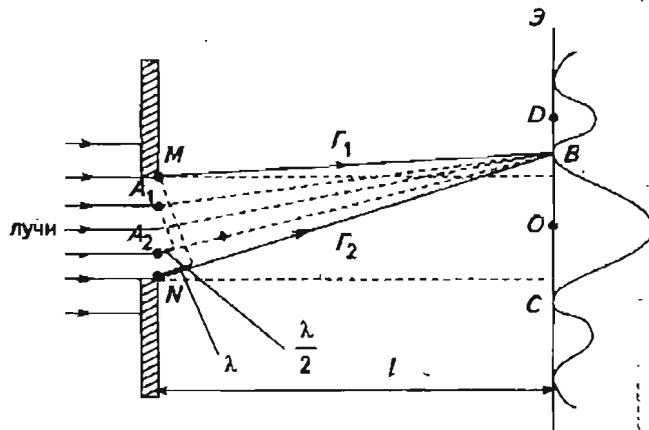


Рис. 98

Дифракция света накладывает ограничения на разрешающую способность оптического микроскопа — не позволяет четко различать мелкие объекты. На рис. 99 показан как раз такой случай. Объект  $MN$  рассматривается в объектив микроскопа  $O$ . Из-за дифракции на экране  $\mathcal{E}$  изображения точек будут иметь форму размытых пятен (максимумов).

Увеличение потеряет смысл, если максимумы изображения сольются. Это произойдет при условии  $a \geq \frac{\lambda F}{d}$ , где  $d$  — диаметр линзы (объектива).

Посмотрим, какой наименьший объект можно наблюдать в красном свете при помощи линзы диаметром 5 см при фокусе 10 см. При расчете получаем, что размер объекта не должен быть меньше  $8 \cdot 10^{-7}$  м. С точки зрения теории принципиально важно, что волновая природа света определяет границы применимости геометрической оптики.

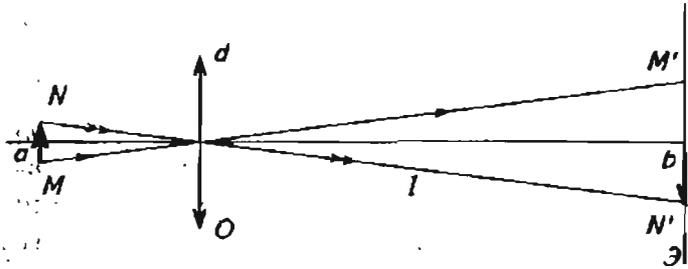


Рис. 99

На явлении дифракции основано действие оптического прибора — дифракционной решетки. Она представляет собой пластинку, на которой нанесено большое количество параллельных штрихов — до нескольких тысяч на 1 мм. На рис. 100 показан принцип действия дифракционной решетки, приведена ее основная характеристика — период  $d$ . Оп-

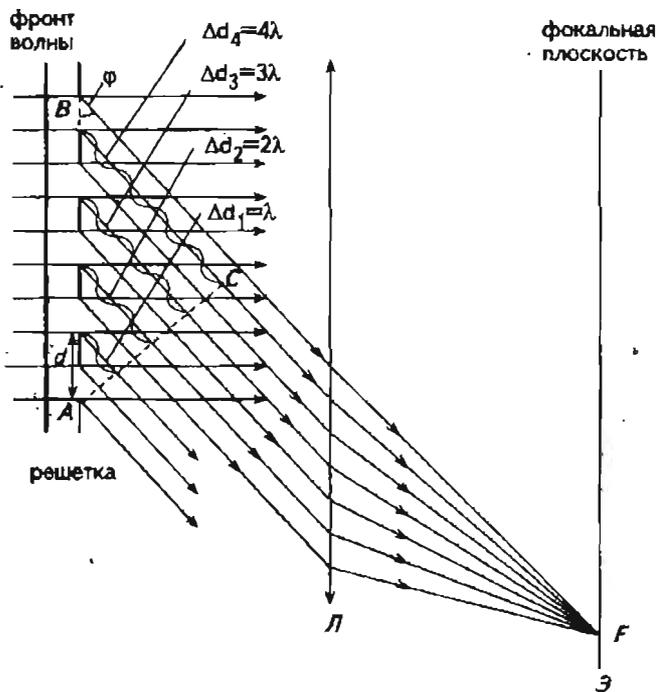


Рис. 100

ределим условие образования максимума. Если разность хода  $BC$  от двух когерентных вторичных источников световых волн  $A$  и  $B$  будет равна целому числу длин волн, то при сложении волн будет максимум. Математически это выражается формулой:  $d \sin \varphi = k \lambda$ , где  $k = 0, 1, 2, \dots$  Линза собирает лучи, идущие под одним углом, в фокальной плоскости на экране. Из формулы видно, что максимумы разных длин волн  $\lambda$  образуются под разными углами  $\varphi$ . Значит, белый свет после прохождения дифракционной решетки разлагается в спектр. Поэтому дифракционную решетку называют спектральным прибором.

Дифракционная решетка с малым периодом  $d$  и большим числом штрихов  $N$  позволяет получить хороший спектр:

- максимумы первого, второго и т. д. порядков располагаются под большими углами  $\varphi$  — спектр широкий (рис. 101);
- амплитуда от  $N$  штрихов в максимуме в  $N$  раз больше амплитуды колебаний световой волны, т. е. максимум во много раз ярче чем от одного штриха (рис. 102).

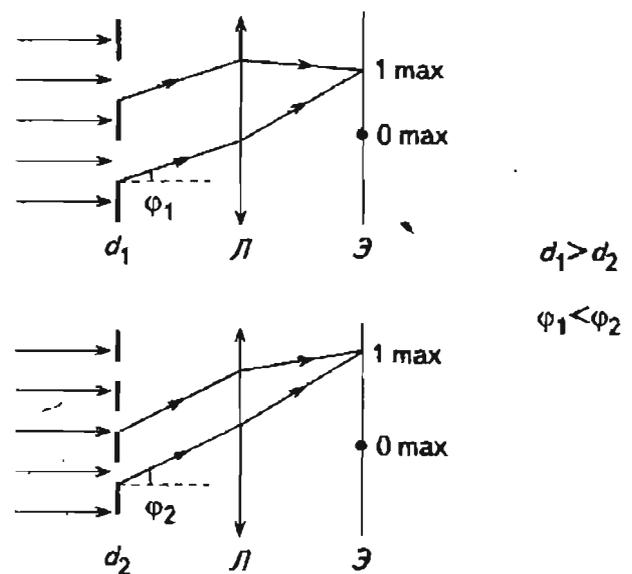


Рис. 101

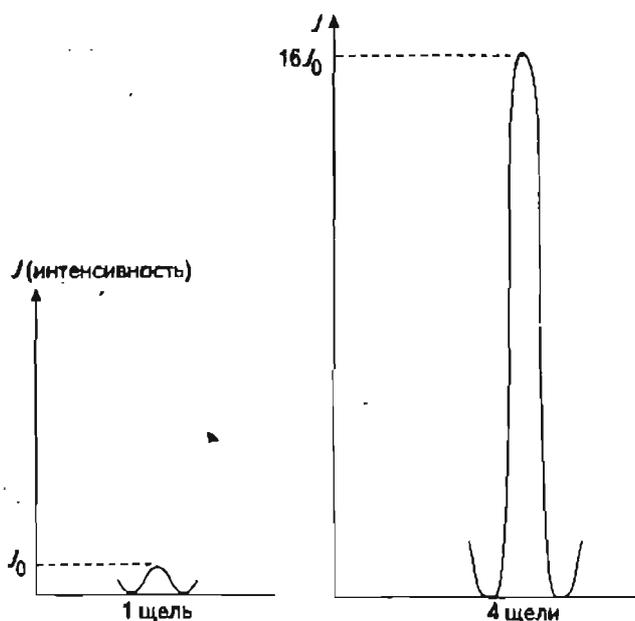


Рис. 102

### Поляризация света

Итак, ранее было выяснено, что белый солнечный свет состоит из ряда монохроматических цветов. В итоге сложения колебаний каждого цвета получаются довольно сложные колебания вектора  $\vec{E}$  (рис. 103). Но и это не все. Естественный свет состоит из волн, вектор  $\vec{E}$  которых колеблется в разных плоскостях (рис. 104). Такой свет называют **естественным**. Для изображения такого света используют условную модель (рис. 105): здесь стрелками показаны направления колебания вектора  $\vec{E}$ . Есть вещества, при взаимодействии света с которыми, происходит явление **поляризации**, т. е. выделение плоскополяризованного света из естественного (рис. 106).

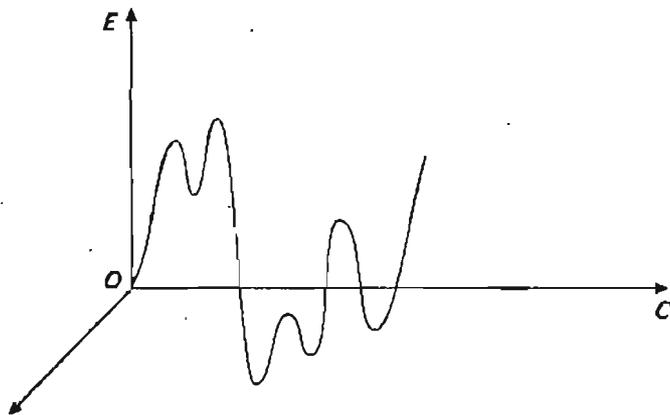


Рис. 103

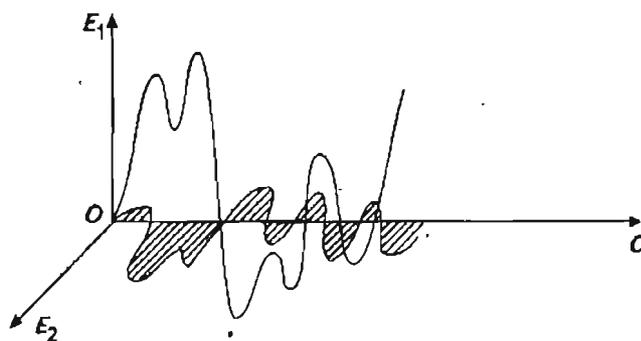


Рис. 104

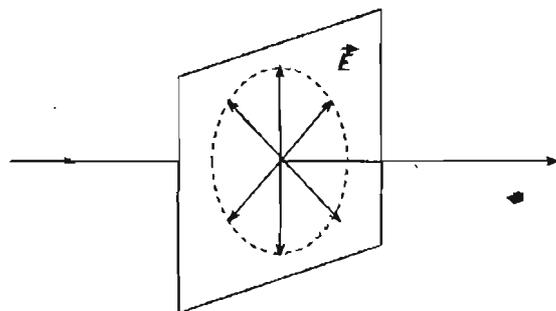


Рис. 105

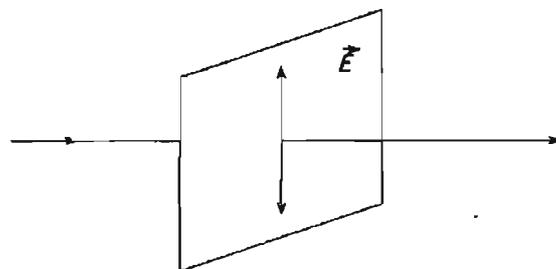


Рис. 106

Если из кристалла турмалина вырезать (одна грань параллельна оси кристалла) пластинку — поляризатор и через нее пропустить свет, то пластинка пропустит только плоскополяризованный свет. Этот свет уже не пройдет через вторую такую же пластинку — анализатор, которая расположена перпендикулярно первой (рис. 107). Удивительно: свет не проходит, хотя обе пластики прозрачные!

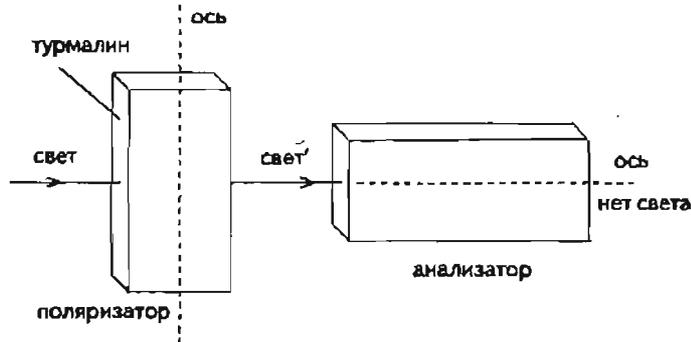
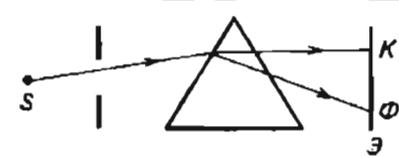
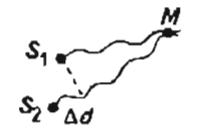
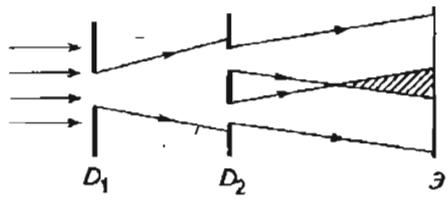
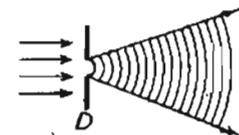
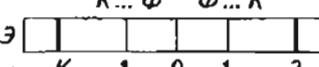
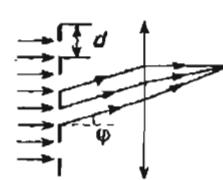
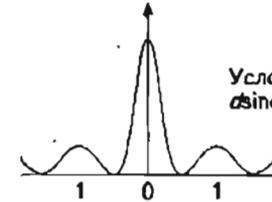
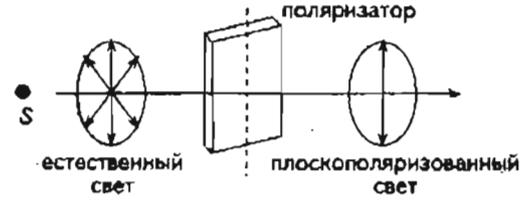
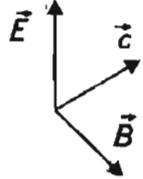


Рис. 107

Таблица 6

<b>ВОЛНОВАЯ ОПТИКА</b>	
<b>Дисперсия</b>	<p>1666 г. И. Ньютон                      Явление зависимости преломления света от частоты <math>n = f(\nu)</math>; скорости волны от частоты <math>v = f(\nu)</math>,                      Белый свет – сложный!  <math>n_v &lt; n_o &lt; n_k &lt; n_s &lt; \dots</math>  <math>v_\phi &lt; v_c &lt; v_r &lt; v_s &lt; \dots</math></p> <p style="text-align: right;"><math>n = \frac{c}{v}</math></p> 
<b>Интерференция</b>	<p>1802 г. Т. Юнг                      Явление сложения когерентных волн с образованием постоянной картины максимумов и минимумов</p>  <p style="text-align: center;"> <math>\min: \Delta d = \frac{\lambda}{2} (2k+1)</math>  <math>\max: \Delta d = k\lambda</math>  <math>k = 0, 1, 2 \dots</math> </p>  <p style="text-align: center;">тонкие пленки</p> 
<b>Дифракция</b>	<p>1665 г. Ф. Гримальди                      Явление огибания светом препятствий                      Условие наблюдения: <math>d \approx \lambda</math>                      Дифракция света на щели – спектр</p>  <p style="text-align: center;"> <math>K \dots \Phi \dots K</math>   </p> <p>Дифракционная решетка – спектральный прибор</p>   <p style="text-align: right;">Условие максимума: <math>d \sin \varphi = k\lambda</math></p>
<b>Поляризация</b>	<p>Явление выделения плоскополяризованного света из естественного</p> <p>1690 г. – обнаружил Х. Гюйгенс                      1706 г. – назвал И. Ньютон                      1873 г. – объяснил Дж. К. Максвелл                      Свет – поперечная волна</p>  

Опыты с поляроидами прямо доказывают, что свет — это электромагнитная поперечная волна. Явление поляризации света (обычно частичная поляризация) при взаимодействии с веществом (при отражении, преломлении) используется для изучения свойств вещества. Плоскополяризованный свет также используется для исследований.

Краткие обобщенные знания о волновых явлениях света представлены в таблице 6.

### Поглощение света веществом. Цвета тел

Итак, ранее было выяснено, что вещество действует на свет, на световые волны. Это действие приводит к следующим результатам:

- а) происходит отражение света;
- б) происходит преломление света;
- в) происходит дисперсия света;
- г) происходит дифракция света.

Но взаимодействие света и вещества приводит еще к одному важному явлению — поглощению света веществом. Природа поглощения света веществом заключается в следующем. Электроны атомов или молекул вещества колеблются. И если частота световой волны совпадает с собственной частотой колебаний электронов, то происходит резонанс. При этом часть энергии световой волны передается электронам, т. е. атомам или молекулам вещества. Фактически происходит нагрев вещества.

Разные вещества поглощают свет по-разному: одни слабо — они прозрачны, другие сильно — они непрозрачны. Важно и то, что тела поглощают свет разных частот по-разному: какие-то монохроматические волны поглощаются сильнее, какие-то поглощаются мало. В итоге спектральный состав света после прохождения через вещество может меняться. И обычно меняется.

Глаз человека в большинстве случаев получает свет, отраженный от тел и нередко прошедший сквозь тела. В зависимости от того, какие составляющие естественного света лучше отражаются, какие сильнее поглощаются телом, мы воспринимаем цвет тела. Зеленый листочек потому зеленый, что от него лучше всего отражаются световые волны «зеленого цвета». Если дачный домик покрашен зеленой краской, то этот слой краски преимущественно и отражает зеленые лучи, поглощая все остальные. Так формируется многообразие цветов окружающего мира.

Цвет нашего неба объясняется рассеиванием солнечного света воздухом атмосферы, при этом и происходит изменение спектрального состава света в сторону голубой части спектра. Небо кажется голубым.

*Лабораторные работы*

### Наблюдение интерференции и дифракции света

**Оборудование:** две чистые стеклянные пластинки небольшого размера, соломинка для выдувания мыльных пузырей, проволочное кольцо, раствор мыла, два специально закрепленных лезвия, картон или пленка с отверстиями разного диаметра, достаточно мощная лампа с прямой нитью накала.

**Ход работы**

#### *Изучение явления интерференции*

1. Чистые стеклянные пластинки положить друг на друга, прижать, в отраженном свете на темном фоне поискать (особенно по краям) цветные интерференционные полосы.

Выделить особенности наблюдаемого явления: постоянная картина или нет, есть ли максимумы, окрашены ли полосы. Вид картины зарисовать, выполнить рисунок с объяснением метода образования когерентных источников света. Изучить, при каких условиях интерференционная картина изменяется. Получается ли опыт в проходящем свете?

2. Получить мыльную пленку на проволочном кольце и мыльные пузыри. Как доказать, что и в этом случае наблюдается интерференционная картина? Отличается ли она от картины в опыте с пластинками? В каком свете наблюдается интерференционная картина? О чем говорит изменение вида полос на мыльной пленке? Сколько максимумов можно зафиксировать?

#### *Изучение явления дифракции*

1. Сквозь вертикальную щель, образованную двумя лезвиями бритвы, наблюдать источник света. Можно ли заметить разделение светового потока на линии? Много ли этих линий? Какого они цвета? Чем являются окрашенные световые линии: максимумами или минимумами интер-

ференционной картины? Почему происходит разложение белого света в спектр при прохождении им щели? Выполнить рисунок картины дифракции от щели. Изменяется ли наблюдаемая картина, если размер щели увеличить?

2. Выполнить наблюдение дифракции на круглом отверстии. Чем отличается вид полученной картины от картины дифракции на щели? Докажите, максимум или минимум наблюдается в центре картины? Выполните примерный рисунок наблюдаемой картины. На рисунке четко обозначить расположение цветов в спектре относительно центрального максимума.
3. Сравните дифракционные картины, получаемые с помощью полоски капрона, части грампластинки или компакт-диска. В каком случае спектр ярче и почему? Для пояснения ответа сделайте схематический рисунок.

### Измерение длины световой волны с помощью дифракционной решетки

**Оборудование:** прибор для определения длины световой волны (рис. 108), дифракционная решетка с периодом 0,02 мм или 0,01 мм, штатив, матовая электрическая лампа (свеча или другой источник света), светофильтры.

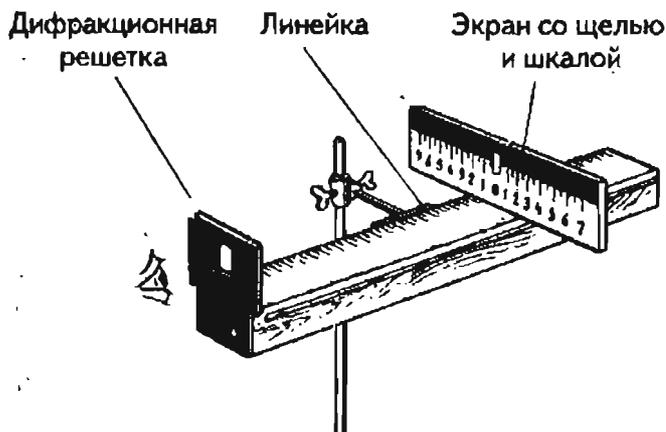


Рис. 108

### Теоретическая часть

Если смотреть сквозь дифракционную решетку на точечный источник света  $S$ , то на экране мы будем наблюдать изображения дифракционных максимумов, т. е. дифракционные спектры (рис. 109).

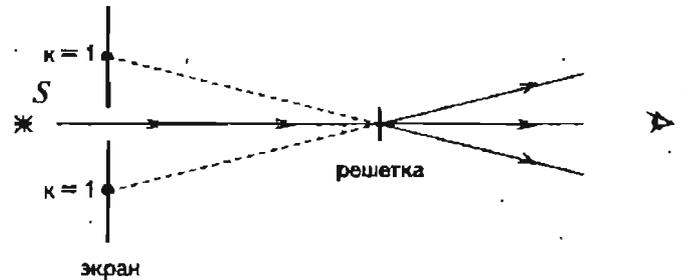


Рис. 109

В опыте мы изучаем явление дифракции света после прохождения дифракционной решетки. С точки зрения принципа Гюйгенса-Френеля каждая точка, до которой дошел фронт волны, становится источником вторичных волн, т. е. точки  $A, B, C, D, E$  и т. д. — источники сферических волн (рис. 110). Все эти, так называемые «вторичные источники света», — когерентные источники. Причем в начальный момент у них и фазы колебаний одинаковы, раз свет до всех этих точек дошел в один момент времени. Дойдя до экрана, вторичные волны, в зависимости от условий сложения (от разности хода), дают максимумы или минимумы. На экране наблюдается интерференционная картина.

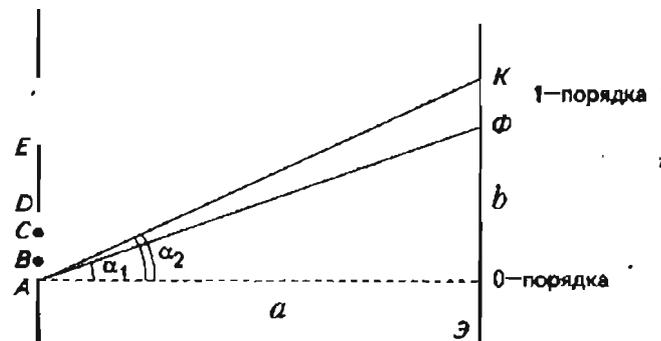


Рис. 110

Согласно формуле расчета максимума дифракционной картины  $d \sin \alpha = k \lambda$ , в спектре одного порядка (на рис. 110 — первого) для разных длин волн  $\lambda$  — разные углы  $\alpha$ . Значит, каждый максимум становится на экране протяженным, от фиолетового до красного. Раз красный свет имеет большую длину волны, то он отклоняется сильнее, в каждом спектре расположен дальше от центрального максимума.

### Ход работы

1. Записать в тетради название работы, оборудование, теоретическую часть в виде рис. 110, подготовить таблицу для записи показаний (см. ниже).

№	Цвет спектра	Период решетки	Порядок спектра	$a$	$b$	$\lambda$

- Вставить дифракционную решетку в рамку, расположить экран на расстоянии 40 или 50 см от решетки, смотреть через решетку на источник света и наблюдать дифракционные спектры.
- Выбрать красную линию в спектре первого порядка, измерить (по возможности аккуратно) ее положение на экране — расстояние  $b$ , проделать то же самое для фиолетовой линии. Записать (лучше получить) рабочую формулу для расчета:

$$\lambda = \frac{d \sin \alpha}{k}$$

Для нашего случая  $k = 1$ ,  $\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = \frac{b}{a}$ .

По полученной формуле выполнить расчет.

- Полученные в ходе эксперимента и расчета значения  $\lambda$  сравнить с табличными. Сделать выводы.

### Контрольные задания

- При том же значении  $a$  проделать измерения и выполнить расчет длины волны красного света при использовании красного светофильтра. Результаты расчета сравнить с ранее полученным значением длины волны.
- Сколько порядков спектра можно получить с помощью данной дифракционной решетки? Проведите измерения и расчеты для длины волны красного света для второго спектра. Результаты сравните с ранее полученными.
- Как и почему изменяется дифракционная картина, если часть дифракционной решетки закрыть? Чем отличается дифракционный спектр от дисперсионного?
- (Уровень В). В качестве источника света возьмите свечу или спиртовку. Исследуйте изменения в дифракционном спектре, помещая в

пламя на кончике проволоки крупинки поваренной соли. С какой практической целью можно использовать подобный эксперимент?

### Самостоятельная работа

- Для хорошего понимания рассмотренных явлений следует твердо отвечать на следующие вопросы.

**Дисперсия.** В чем состоит явление дисперсии света? Как можно на опыте наблюдать явление дисперсии света? Какие выводы сделал Ньютон в результате экспериментального изучения дисперсии? Какова причина разложения белого света в спектр при прохождении через призму? В чем причина радуги? Можно ли искусственно получить радугу? В какой среде свет распространяется криволинейно?

**Интерференция.** Чем отличается сложение световых потоков от интерференции света? Что такое интерференция света: явление или свойство света? Каковы характерные черты явления интерференции? Каким методом чаще всего получают когерентные источники света? С любыми ли монохроматическими волнами возможна интерференция света? Что произойдет с интерференционной картиной, если вместо красного света использовать фиолетовый? Какие характеристики явления интерференции вам известны? В чем состоит метод «просветления оптики»?

**Дифракция.** При каких условиях происходит дифракция света? Всегда ли дифракция света наблюдаема? Можно ли наблюдать дифракцию света на металлическом стержне? В чем различие между дифракцией света и электромагнитных волн? Почему частицы размером меньше 0,3 мкм в оптический микроскоп нераз-

личимы? Чем отличается дифракция на щели от дифракции на отверстиях? Почему дифракционная картина окрашена в спектр? Чем отличаются между собой дифракционный и дисперсионный спектры? Докажите, что дифракция определяет границы применимости геометрической оптики?

**Поляризация.** В чем причина неполяризованности солнечного света? В чем выражается поляризация света? О чем говорит существование поляризации света? Что нового о природе света позволяет узнать поляризация? Всегда ли свет может проходить через прозрачный материал? Поляризация — это явление или свойства света?

**Поглощение света.** Почему на восходе или закате солнце имеет красноватый цвет? О чем говорит насыщенный красный цвет ткани? Как образуются различные оттенки цвета тел? Почему при искусственном освещении цвет ткани (по сравнению с дневным светом) может измениться? Можно ли увидеть тело красного цвета при освещении его красными лучами?

2. Изучите пример решения следующей задачи. На дифракционную решетку падает белый свет. Спектры какого порядка будут перекрываться?

**Решение**

*Первый этап:* анализ текста задачи, выделение изучаемого явления, выполнение поясняющего рисунка.

Белый свет состоит из монохроматических цветов. Для определенности выберем следующие границы длин волн: от 380 нм для фиолетового света до 760 нм для красного света. В принципе, возможно перекрывание максимумов  $k$  и  $(k+1)$  порядков (рис. 111). Прежде всего, будут пересекаться красный свет (на рисунке луч)  $k$ -спектра и фиолетовый свет  $(k+1)$ -спектра. Условие очевидно: для каких-то спектров эти лучи должны идти под одним углом.

*Второй этап:* математические действия, расчеты.

На рис. 111 для наглядности почти перекрываются спектры второго и третьего порядков. До-

кажем, так ли это. Для выделенных лучей запишем условие образования максимума:

$$d \sin \alpha_1 = k \lambda_{\text{кр}} \quad \text{и} \quad d \sin \alpha_2 = (k+1) \lambda_{\text{ф}}$$

При равенстве по условию углов получаем, что  $k \lambda_{\text{кр}} = (k+1) \lambda_{\text{ф}}$ . Отсюда уже определяем, для какого спектра  $k$  это условие выполняется:

$$k = \frac{\lambda_{\text{ф}}}{\lambda_{\text{кр}}} - \lambda_{\text{ф}}$$

Расчет дает значение  $k = 1$ .

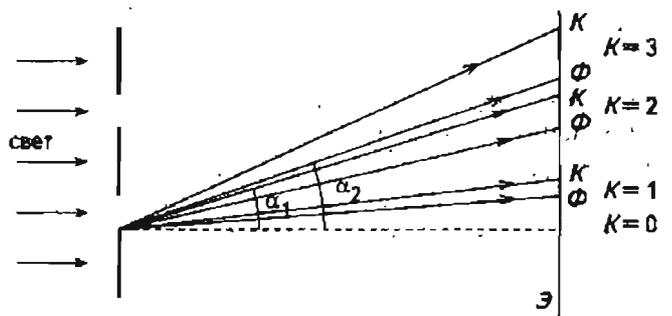


Рис. 111

Вывод: нулевой и первый спектры еще не будут пересекаться, но уже красный свет третьего спектра перекроет фиолетовый свет четвертого спектра. В заключение следует сделать рисунок этого случая.

Приведем для тренировки несколько типичных задач на определение характеристик волновых явлений.

- 1) Какой наибольший порядок спектра можно наблюдать при использовании дифракционной решетки, имеющей 500 штрихов на 1 мм, при освещении ее монохроматическим светом с длиной волны 720 нм?

(Подсказка: при каком угле  $\phi$  получается максимальный спектр  $k$ ?)

- 2) Какие из перечисленных природных явлений обусловлены интерференцией света: радужная окраска крыльев насекомых, радужная окраска нефтяного пятна на воде, цветные полосы на поверхности грампластины (компакт-диска), радуга?

- 3) Спектры какого порядка можно наблюдать на дифракционной решетке с периодом  $1,2 \cdot 10^{-3}$  см при освещении ее светом с длиной волны  $5 \cdot 10^{-7}$  м?

*Творческие задания*

Для индивидуального выполнения дома

1. В результате анализа текста статьи О. Френеля «Дифракция света» (Хрестоматия по физике: Учеб. пособие для учащихся 8–10 кл. ср. шк. — М.: Просвещение, 1987. — с. 160–161) найдите ответы на следующие вопросы. Экспериментальные или теоретические аргументы использует Френель для доказательства неспособности корпускулярной теории света объяснить дифракцию? Можно ли сказать, что в своих рассуждениях Френель опирался на признанную и сейчас логику познания явлений: гипотеза — следствие — эксперимент? Обоснуйте ответ примером из статьи. Докажите, соответствует ли формулировка принципа Гюйгенса, данная Френелем, современному принципу Гюйгенса-Френеля?
2. Изучите теорию работы световодов. Предложите два–три проекта световода, подберите оборудование и сконструируйте установку (рис. 112).

Экспериментально исследуйте распространение света в световоде. По результатам работы

подготовьте реферат и сделайте доклад. Литература: Майер В. В. Полное отражение в простых опытах. — М.: Наука, 1986; Тарасов Л. В., Тарасова А. Н. Беседы о преломлении света. — М.: Наука, 1982.

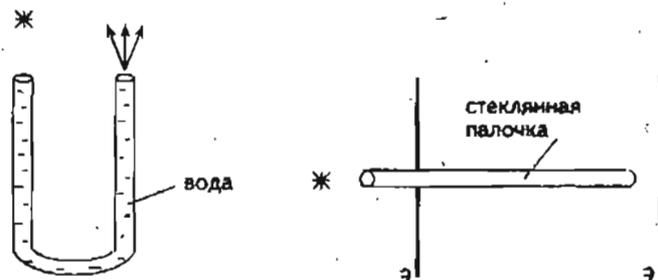


Рис. 112

3. Изучите теорию дифракционной решетки. Экспериментально исследуйте свойства двух–трех разных дифракционных решеток. При проведении опытов, в частности, руководствуйтесь вопросами: какое количество спектров получается с помощью решетки? Какие спектры пересекаются? Как меняется ширина спектра при увеличении его порядка? Как и почему меняется дифракционная картина при поворачивании решетки вокруг вертикальной оси? Как и почему изменяется дифракционная картина, если часть решетки закрыть?

# Обобщения электродинамики



## Изучив эту тему,

- ♦ вы узнаете несколько новых видов электромагнитных волн;
- ♦ поймете, что все виды электромагнитных волн имеют общую природу;
- ♦ научитесь определять свойства электромагнитного излучения по его частоте

## Основные понятия:

Шкала электромагнитных волн ♦ Радиоволны ♦ Инфракрасные лучи ♦ Световые волны ♦ Ультрафиолетовые лучи ♦ Рентгеновское излучение ♦ Гамма-излучение

## 1. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА КАК ФИЗИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

Под обобщениями электродинамики следует понимать самые важные и самые общие сведения из этой области физики. Таким образом, ниже будет некоторое повторение ранее изученного, но будет и подведение итога изучению электромагнитных волн.

Ранее рассматривались отдельные темы электродинамики. В физике же электродинамика представляет собой систему знаний в форме физической теории, т. е. эти знания имеют определенную структуру. В простом варианте на качественном

языке систематизация знаний электродинамики как теории выполнена в таблице 7. Конечно, на самом деле фундаментальные законы электродинамики представляют собой дифференциальные уравнения (с производными), получившие название уравнений Максвелла. Но в школе их не пишут и не решают.

Следствия из законов электродинамики так обширны, что многие из них представляют собой целые разделы физики или техники. Например, на схеме 13 представлено использование света. В прямом смысле жизнь современного общества без света невозможна.

Итак, основным объектом изучения электродинамики является электромагнитное поле. Но в разных случаях оно проявляется по-разному, в виде разных полей: электростатического (электрического), магнитного, стационарного электрического, вихревого электрического, переменного электрического. В таблице 8 приведены наиболее типичные физические явления, существование (причина) которых связано с соответствующим полем.

### Шкала электромагнитных волн

Что такое электромагнитные волны? Это процесс распространения с течением времени электромагнитного поля в пространстве. Чем отличаются электромагнитные волны друг от друга? Как уже указывалось ранее, волны различаются между собой прежде всего частотой.

В настоящее время все известные электромагнитные волны объединены в шкалу по принципу возрастания частоты. Более ста лет, фактически с начала XIX в., продолжалось открытие все новых и новых волн. Единство волн было доказано теорией Максвелла. До него многие волны рассматривались как явления разной природы.

Вся шкала (полный набор волн) электромагнитных волн разделена на диапазоны по частоте и способу излучения:

- **низкочастотные** (от  $3 \cdot 10^{-3}$  до  $3 \cdot 10^3$  Гц) генерируются электрическими генераторами;
- **радиоволны** (от  $3 \cdot 10^4$  до  $3 \cdot 10^{12}$  Гц) генерируются вибраторами Герца, антеннами;
- **инфракрасные лучи** (от  $3 \cdot 10^{11}$  до  $4 \cdot 10^{14}$  Гц) генерируются нагретыми телами;
- **световые волны** (от  $4 \cdot 10^{14}$  до  $8 \cdot 10^{14}$  Гц) генерируются телами, нагретыми до сравнительно высокой температуры, в частности, это лампы накаливания;
- **ультрафиолетовые лучи** (от  $8 \cdot 10^{14}$  до  $3 \cdot 10^{16}$  Гц) генерируются телами, нагретыми до высокой температуры — до  $3000^\circ\text{C}$  и выше; это, прежде всего, Солнце; на Земле — дуговой разряд;
- **рентгеновское излучение** (от  $3,7 \cdot 10^{15}$  до  $3 \cdot 10^{20}$  Гц) генерируется при торможении заряженных частиц в электрических полях;
- **гамма-излучение** (от  $3 \cdot 10^{19}$  Гц и более) генерируется при распаде атомов.

Строгих границ между отдельными диапазонами электромагнитных волн нет. Это и понятно, раз частота изменяется непрерывно. На границах диапазонов вид волны устанавливается по способу ее излучения, т. е. электромагнитная волна одной и той же частоты может быть в том или другом случае отнесена к разному виду волн. Например, излучение с длиной волны в  $100 \text{ мкм}$  может быть отнесено к радиоволнам или к инфракрасным волнам. Исключение — видимый свет.

Общие свойства и характеристики всех видов электромагнитных волн приведены в таблице 9.

**Инфракрасное излучение.** Некоторые диапазоны электромагнитных волн ранее нами не изучались. А эти волны окружают человека и имеют для него важное значение. Первый пример — инфракрасное излучение, которое еще называют **тепловым**.

Основные сведения об инфракрасном излучении приведены в таблице 10. Самая простая установка для наблюдения инфракрасного излучения изображена на рис. 113. В опытах можно использовать любой источник теплового излучения — утюг, нагреватель. Вопросы, на которые легко экспериментально найти ответы: изменяется ли интенсивность излучения по мере удаления от источника? Как на опыте доказать, что листок станиоля отражает инфракрасные лучи? Какой из предметов: лист станиоля или лист бумаги, — лучше пропускает инфракрасное излучение?

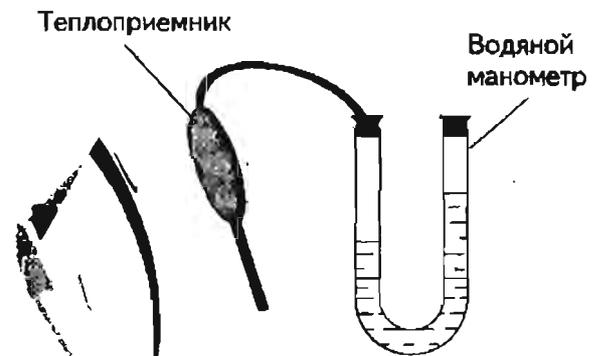


Рис. 113

**Ультрафиолетовое излучение.** За фиолетовым концом солнечного спектра экспериментально можно обнаружить невидимое глазом излучение — ультрафиолетовое. На схеме 14 систематизированы основные сведения об этих электромагнитных волнах. В школе ультрафиолетовое излучение экспериментально получают с помощью специального освети-

теля или электрической дуги. При наличии источника волн можно поставить простые опыты по выяснению некоторых свойств излучения:

- а) действие на люминесцентный экран, фотобумагу;
- б) поглощение излучения стеклом, отражение металлами;
- в) ионизация воздуха.

На рис. 114 изображена схема простейшей экспериментальной установки. В качестве индикатора можно использовать люминесцентный экран.

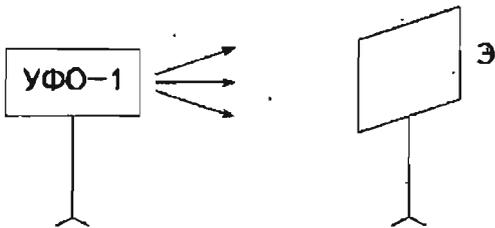


Рис. 114

**Рентгеновское излучение.** В 1895 г. немецкий физик В. Рентген (1845–1923) экспериментально открыл существование нового вида излучения. Теоретическое и практическое значение этого открытия было так велико, что в 1901 г. первому среди физиков Рентгену была присуждена Нобелевская премия. Он проводил опыты по изучению электрического тока в трубке, из которой выкачен воздух (рис. 115). Оказалось, что при высоком напряжении в несколько тысяч вольт анод становится источником неизвестного X-излучения.

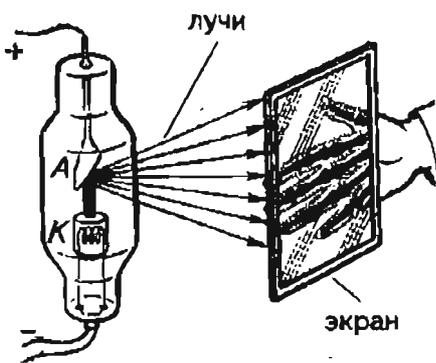


Рис. 115

Естественно, прежде всего, ученый постарался определить свойства нового излучения. Для этого ставились и ставились все новые и новые опыты. Что же выяснилось? Сам Рентген, в частности, описал следующие свойства нового излучения:

1. Сильная проникающая способность новых лучей: легко проходят через книгу толщиной в

1000 страниц, тонкие металлические пластинки и др. Проницаемость тел зависит от их плотности и толщины.

2. Лучи действуют на фотопластинку, ионизируют воздух, т. е. разряжают наэлектризованные тела.
3. В 1895 г. ученый писал:
 

«...мне не удавалось, несмотря на все усилия, получить отклонение X-лучей магнитом даже в очень сильных магнитных полях».
4. Но в опытах однозначно не удалось определить, отклоняются или нет X-лучи при прохождении призмы. Сам ученый писал:

«...с призмами из эбонита и алюминия с преломляющим углом также в  $30^\circ$  я получал на фотографической пластинке снимки, на которых как будто можно заметить отклонение. Но это весьма неясно...»

После открытия нового излучения почти сразу были высказаны гипотезы о том, что это вид электромагнитных волн. Но трудности при экспериментальном изучении ряда свойств излучения (дифракции, поляризации и др.) затянули окончательное доказательство гипотезы более чем на десять лет. При изучении сложных явлений в физике так бывает нередко! На схеме 15 систематизированы основные сведения о рентгеновском излучении.

Усилия ученых по доказательству гипотезы об электромагнитной природе рентгеновского излучения были вознаграждены в 1912 г. В этом году немецкий физик-теоретик Макс Лауэ (1879–1960) разработал теорию интерференции рентгеновских лучей на кристаллах, упорядоченное расположение атомов которых создавало подобие дифракционной решетки с малым периодом порядка  $3 \cdot 10^{-10}$  м. Почти сразу же предсказания теории были экспериментально подтверждены. Схема опыта и полученная интерференционная картина приведены на рис. 116.

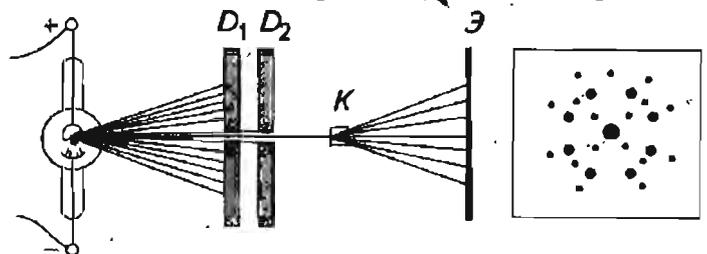


Рис. 116

Изучение дифракционной картины позволило определить длину волны рентгеновского излучения. За открытие дифракции X-лучей М. Лауэ в 1914 г. был удостоен Нобелевской премии.

<b>ОСНОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ</b>	
Объекты изучения	Электромагнитные поля. Электромагнитные волны Электрические заряды
Экспериментальные факты	Взаимодействие электрических зарядов. Взаимодействие токов. Действие электрического тока на магнитную стрелку и др.
Идеализированные объекты	Точечный заряд. Свободные электроны. Электронный газ. Однородное электрического поле. Монохроматическая электромагнитная волна (и ряд других)
Фундаментальные понятия	Электрический заряд. Электромагнитное поле. Электромагнитная волна
Физические величины	Напряженность. Магнитная индукция. Сила тока. Напряжение. Сопротивление проводника. Энергия поля. Частота и длина волны
<b>ЯДРО ТЕОРИИ</b>	
Законы сохранения	Законы сохранения энергии электромагнитного поля, импульса, заряда замкнутой системы
Законы	Покоящиеся и движущиеся заряды образуют электрическое поле, силовые линии которого начинаются и заканчиваются на зарядах  В природе нет магнитных зарядов; линии магнитной индукции замкнуты  Движущиеся электрические заряды порождают магнитное поле, линии магнитной индукции которого охватывают линии тока  Переменное магнитное поле порождает переменное электрическое поле, силовые линии которого замкнуты и охватывают линии магнитной индукции  Переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле, линии магнитной индукции которого замкнуты и охватывают силовые линии напряженности электрического поля
Фундаментальные постоянные	Скорость электромагнитных волн. Заряд и масса электрона. Электрическая постоянная. Магнитная постоянная
<b>СЛЕДСТВИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ</b>	
Теоретические следствия	Расчеты излучения электромагнитных волн. Предсказание существования электромагнитных волн. Расчеты электрических цепей. Выяснение природы света
Технические применения	Радиосвязь. Телевизионная связь. Получение, передача и потребление электроэнергии. Оптические приборы

**СХЕМА 13**



Таблица 8

Поле	Физическое явление
Электростатическое (электрическое)	Взаимодействие электрических зарядов. Электризация тел. Заземление
Магнитное (магнитостатическое)	Взаимодействие постоянных магнитов: отталкивание и притяжение. Взаимодействие токов. Действие поля на движущийся заряд.
Стационарное электрическое	Постоянный электрический ток. Магнитное поле постоянного тока. Нагревание проводников
Переменное магнитное	Возникновение переменного магнитного поля. Переменный электрический ток в контуре
Вихревое электрическое	Возникновение вихревого электрического поля. Переменный электрический ток в проводнике
Переменное электрическое ( $E$ изменяется по гармоническому закону)	Переменный электрический ток. Трансформация переменного электрического тока.
Электромагнитное	Электромагнитные волны. Радиоволны. Световые волны

Таблица 9

ОБЩИЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН	
Свойства	Характеристики
Распространение в пространстве с течением времени	Скорость электромагнитных волн в вакууме постоянна и равна приблизительно $300\,000 \frac{\text{км}}{\text{с}}$
Все волны поглощаются веществом	Различные коэффициенты поглощения (в школе их не изучают)
Все волны на границе раздела двух сред частично отражаются, частично преломляются	Законы отражения и преломления. Коэффициенты отражения для разных сред и разных волн (в школе не изучаются)
Все электромагнитные излучения проявляют свойства волн: складываются, огибают препятствия. Несколько волн одновременно могут существовать в одной области пространства	Принцип суперпозиции. Для когерентных источников правила определения максимумов. Принцип Гюйгенса-Френеля. Волны между собой не взаимодействуют
Сложные электромагнитные волны при взаимодействии с веществом раскладываются в спектр — дисперсия	Зависимость показателя преломления среды от частоты волны. Скорость волны в веществе зависит от показателя преломления среды $v = \frac{c}{n}$
Волны разной интенсивности	Плотность потока излучения $I$

Таблица 10

ИНФРАКРАСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ	
Открытие	1800 г. — английский физик и астроном У. Гершель
Излучатели	Источники волн — все нагретые тела. Например: Солнце (до 50% солнечной энергии, падающей на Землю), лампочка накаливания (до 95% излучения)
Приемники	Термоэлементы, ИК-терморезисторы, водяной манометр с теплоприемником
Свойства	Все свойства волн: отражение, преломление, интерференция и др. Не вызывают зрительных ощущений Черное стекло, черная бумага — прозрачны для этих волн, вода, водяные пары — не прозрачны
Применение	Нагревание и сушка тел Фотографирование (геофизика, медицина и др.) Тепловые локаторы, системы самонаведения, приборы ночного видения (см. рис.)

1 — фотокатод  
2 — экран люминесцентный  
3 — электроны

**СХЕМА 14****Открытие диапазона**

- ✓ С 1801 по 1927 г. ученые разных стран

**Приемники**

- ✓ Термоэлементы
- ✓ Фотодиоды
- ✓ Люминесцирующий экран

**Источники волн**

- ✓ Солнце (около 10% энергии)
- ✓ Электрическая дуга
- ✓ Ртутная лампа

**Свойства**

- ✓ Обладает всеми свойствами волн
- ✓ Не вызывает зрительного ощущения
- ✓ Ионизирующее действие

**УФ-ИЗЛУЧЕНИЕ****Применение**

- ✓ Фотография в УФ-лучах
- ✓ Бактерицидные лампы в медицине
- ✓ Ртутные лампы для освещения

**СХЕМА 15****ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О РЕНТГЕНОВСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ****Факты**

- ✓ Существование некоего X-излучения, открытие В. Рентгена
- ✓ Экспериментально обнаруженные свойства лучей: невидимое излучение, ионизация воздуха и др.
- ✓ Источники: рентгеновская трубка, Солнце, звезды

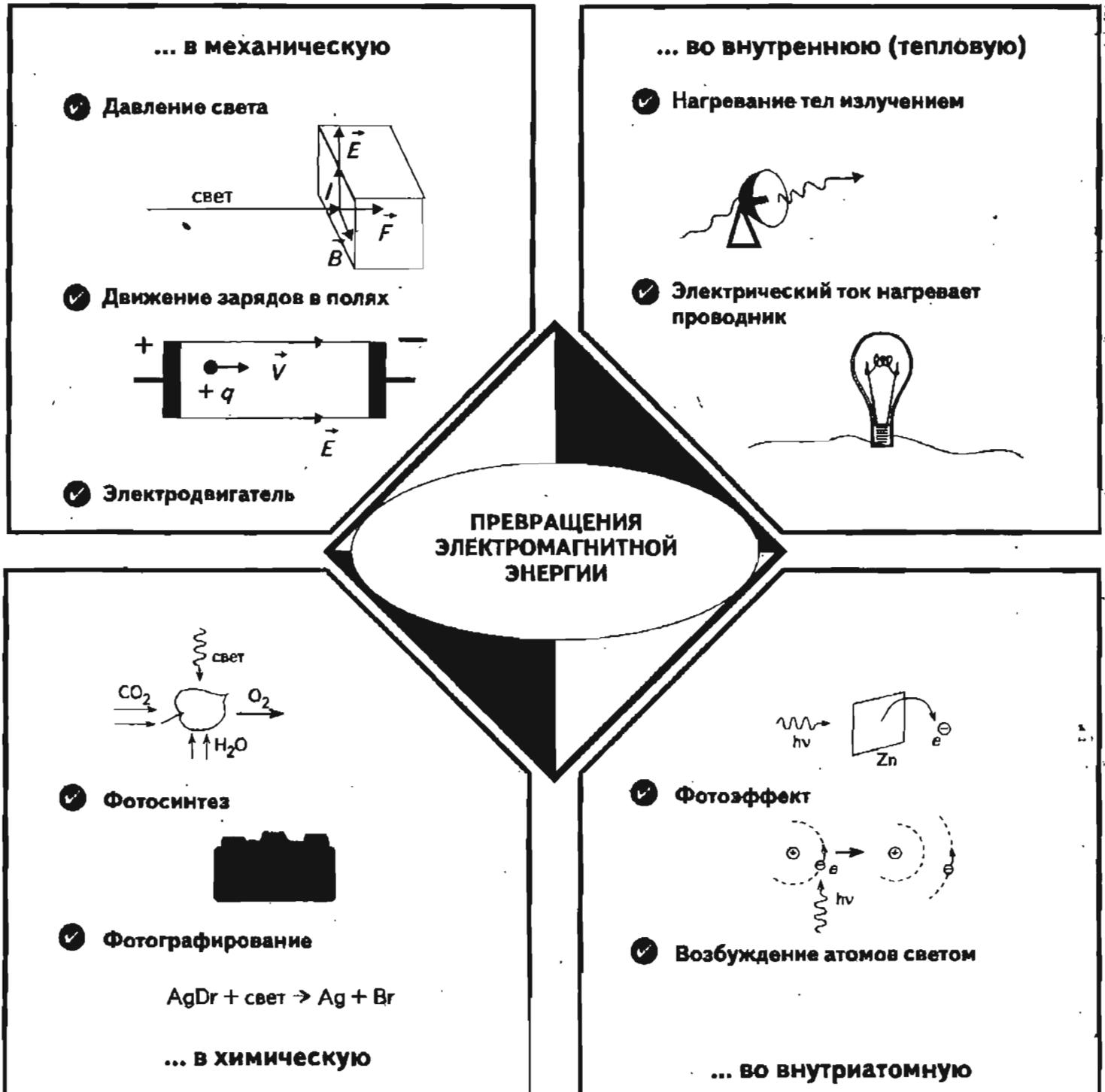
**Модель (гипотеза о природе, средства описания и др.)**

- ✓ X-лучи — это электромагнитные волны
- ✓ Электромагнитные волны очень короткой длины:  $10^{-9}$  —  $10^{-10}$  м
- ✓ X-лучи образуются в результате резкого торможения быстрых электронов веществом анода
- ✓ Предсказание ряда свойств излучения: дифракция, поляризация

**Следствия, применение**

- ✓ Медицина: получение рентгенограмм внутренних органов
- ✓ Техника: рентгеновская дефектоскопия
- ✓ Наука: изучение структуры кристаллов и белковых молекул, рентгеновская спектроскопия, рентгеновский микроскоп и др.

## СХЕМА 16



*Самостоятельная  
работа***Качественные вопросы и задачи**

Почему зимой облачные дни теплее солнечных? Почему в горах рекомендуют использовать солнцезащитные очки? Какое свойство инфракрасных лучей широко используется на практике? Почему баллоны некоторых ламп, используемых в медицине, делают из кварцевого стекла? Каковы отличия между световыми и рентгеновскими электромагнитными волнами? Почему не удалось получить дифракционную картину рентгеновского излучения с помощью лучших дифракционных решеток?

**Примеры наиболее типичных задач**

1. Электрон под действием электрического поля перед анодом (рис. 115) приобрел скорость  $1,32 \cdot 10^7 \frac{м}{с}$ . Какое напряжение было приложено к рентгеновской трубке?
2. При каком напряжении между катодом и анодом — 50 или 100 кВ — будут излучаться рентгеновские лучи с более короткой длиной волны?
3. На дифракционную решетку с периодом 0,001 мм падает ультрафиолетовое излучение с длиной волны от  $10^{-7}$  до  $10^{-8}$  м. Какова будет ширина спектра первого порядка, если экран расположен на расстоянии 1 м от решетки?

При изучении и описании явлений природы важное значение имеют преобразования энергии. На схеме 16 показаны возможные превращения электромагнитной энергии в другие виды энергии, приведены примеры процессов.

*Школьный  
тест*

Ориентировочно за 40–45 минут из 20 заданий на оценку «удовлетворительно» нужно выполнить 11–12, из них одну расчетную задачу. На оценку «отлично» следует выполнить 15–16 заданий, из них одну задачу повышенной трудности.

**Задания на понимание методов научного познания**

1. Какую гипотезу в ходе своих экспериментов фактически доказывал Герц?

- А. О существовании световых волн.
  - Б. О существовании дифракции электромагнитных волн.
  - В. О существовании электромагнитного поля.
  - Г. О существовании электромагнитных волн.
  - Д. Нет верного ответа.
2. В каком из ответов перечислены лишь физические явления?
    - А. Электромагнитное поле, длина волны, отражение света.
    - Б. Плотность потока излучения, дифракция света, поляризация.
    - В. Дифракция, дифракционная решетка, поляризация.
    - Г. Дифракционная решетка, поляризация, дисперсия.
    - Д. Дисперсия света, дисперсия электромагнитных волн, поляризация.
  3. Какими из перечисленных физических величин можно характеризовать электромагнитную волну?
    - А. Плотность потока излучения, показатель преломления, скорость.
    - Б. Скорость света, частота, период дифракционной решетки.
    - В. Период, длина волны, плотность энергии.
    - Г. Нет верного ответа.
    - Д. Ускорение заряда, скорость света, длина волны.
  4. Какие из перечисленных моделей можно использовать для описания световых волн?
    - А. Материальная точка, световой луч, точечный заряд.
    - Б. Точечный заряд, световой луч, световая волна.
    - В. Дифракция света, световой луч, плоская волна.
    - Г. Плоская световая волна, световой луч, монохроматическая волна.
    - Д. Нет верного ответа.

5. Какой из экспериментальных фактов поставил вопрос о существовании границы применимости понятий и законов геометрической оптики?
- А. Преломление света на границе раздела двух сред.
- Б. Разложение белого света в спектр при прохождении призмы.
- В. Изменение скорости распространения света при переходе из одной среды в другую.
- Г. Нет верного ответа.
- Д. Дифракция света.
6. В каком из ответов перечислены лишь объекты природы?
- А. Точечный заряд, свет, дифракция.
- Б. Световой луч, интерференция, радиоприемник.
- В. Свет, скорость, дифракция.
- Г. Частота, электромагнитная волна, радиолокатор.
- Д. Нет верного ответа.

### Задания на качественное описание физических объектов и явлений

7. В каком из утверждений верно назван механизм излучения электромагнитных волн?
- А. Атом движется ускоренно.
- Б. Электрон движется прямолинейно и равномерно.
- В. Электроны движутся прямолинейно и равномерно в проводнике.
- Г. Заряд колеблется.
- Д. В цепи существует постоянный электрический ток.
8. На рис. 117 изображена схема простейшего радиоприемника. Есть ли в этой схеме принципиальные недостатки?
- А. Неправильно подключен конденсатор  $C_1$ .
- Б. Конденсатор  $C_2$  — лишний.
- В. Неправильно подключен диод.
- Г. Неправильно подключена катушка индуктивности.

- Д. Нет верного ответа.

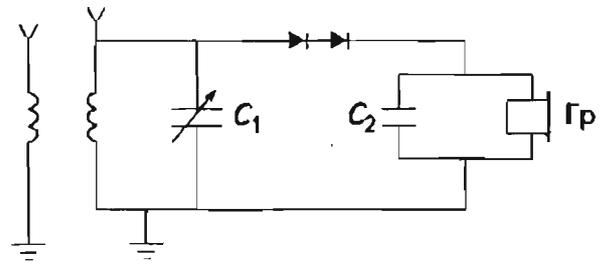


Рис. 117

9. На рис. 118 изображены графики электромагнитных колебаний в открытом колебательном контуре. В каком случае происходит наилучшее излучение электромагнитных волн, и волны несут звуковую информацию?

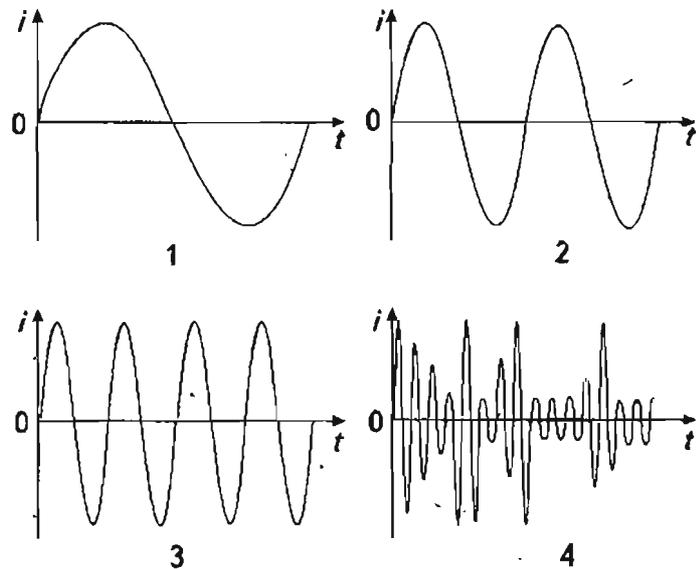


Рис. 118

- А. 1.                       Б. 2.
- В. 3.                       Г. 4.

10. Изменится ли излучение энергии открытым колебательным контуром, если частота электромагнитных колебаний увеличилась в два раза?
- А. Не изменится.
- Б. Уменьшится в два раза.
- В. Увеличится в два раза.
- Г. Увеличится в четыре раза.
- Д. Нет верного ответа.

11. Может ли произойти полное отражение света при переходе его из воды в стекло?

- А. Может, при определенном угле падения света.
- Б. Может, так как показатель преломления воды больше показателя преломления стекла.
- В. Может, так как стекло отражает световые лучи.
- Г. Нет верного ответа.
- Д. Не может, из-за равенства показателей преломления стекла и воды.

12. Какие изменения происходят с электромагнитной волной при переходе ее из одной среды в другую?

- А. Ничего не происходит.
- Б. Происходит изменение частоты колебаний.
- В. Происходит изменение скорости ее распространения.
- Г. Происходит явление полного внутреннего отражения.
- Д. Все приведенные ответы — верные.

13. Какое условие необходимо для того, чтобы происходила дифракция света с длиной волны  $\lambda$ ?

- А. Явление дифракции световых волн происходит всегда при наличии препятствия.
- Б. Дифракция света происходит на препятствиях, размер которых сравним с длиной волны  $\lambda$ .
- В. Дифракция света происходит на препятствиях, размер которых меньше длины волны  $\lambda$ .
- Г. Для наблюдения дифракции необходим мощный источник света.
- Д. Дифракция света устанавливает границы применимости геометрической оптики.

14. Как изменится дифракционная картина, если решетку с периодом 0,02 мм заменить на решетку с периодом 0,01 мм?

- А. Расстояние между максимумами увеличится, максимумы станут шире.
- Б. Не будет изменений.
- В. Расстояние между максимумами уменьшится, ширина максимумов не изменится.
- Г. Расстояние между максимумами увеличится, ширина максимумов не изменится.
- Д. Нет верного ответа.

15. Одинаковы ли скорости распространения световых волн и ультрафиолетового излучения в вакууме и веществе?

- А. В любом случае скорости одинаковы.
- Б. В вакууме скорости распространения любых электромагнитных волн одинаковы, в веществе скорости разные.
- В. В веществе скорости распространения электромагнитных волн одинаковы.
- Г. Нет верного ответа.
- Д. Скорость распространения электромагнитных волн ни от чего не зависит.

### Задания на количественное описание физических объектов и явлений

16. Какова примерно максимальная дальность обнаружения цели радиолокатором, если он излучает 500 импульсов в секунду?

- А. 300 км.
- Б. 500 км.
- В. 250 км.
- Г. 1000 км.
- Д. Нет верного ответа.

17. После прохождения дифракционной решетки светом с длиной волны  $\lambda$  (рис. 119) на экране образовалась дифракционная картина. Чему равна разность хода световых лучей при образовании центрального максимума?

- А.  $d \sin \varphi$ .
- Б.  $k\lambda$ .
- В.  $\lambda$ .
- Г.  $2\lambda$ .
- Д. Равна нулю.

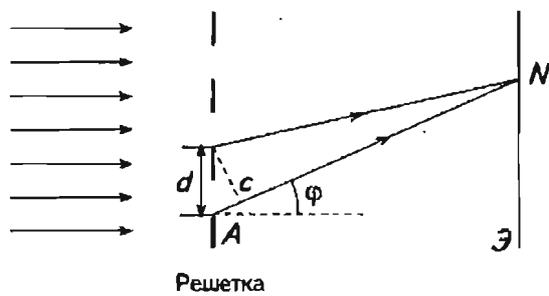


Рис. 119

18. Будет ли наблюдаться полное внутреннее отражение луча света на границе раздела двух сред «вода – воздух», если угол падения  $30^\circ$ , а показатель преломления воды 1,3?
- А. Угол преломления будет меньше  $90^\circ$ .
- Б. Угол преломления будет больше  $90^\circ$ .
- В. Угол преломления будет равным  $90^\circ$ .
- Г. Явление полного внутреннего отражения будет наблюдаться.
- Д. Нет верного ответа.

### Задания повышенной сложности

19. Показатель преломления воды при температуре  $20^\circ\text{C}$  для различных волн видимого излучения лежит в интервале от  $n_1 = 1,3308$  до  $n_2 = 1,3428$ . Каков показатель преломления воды для красных волн спектра?
- А. На вопрос нельзя дать верного ответа.
- Б. Лучи красного света преломляются сильнее, для них показатель преломления наибольший.

- В. Лучи красного света преломляются меньше, чем другие, для них показатель преломления наименьший.
- Г. Показатель преломления воды не зависит от температуры.
- Д. Показатель преломления вещества не зависит от длины волны света.

20. Какая из двух тонких пленок толще, если при освещении солнечным светом, падающим перпендикулярно их поверхности, первая кажется красной, а вторая – зеленой? Ответ пояснить рисунком.
- А. Первая пленка толще второй.
- Б. Вторая пленка толще первой.
- В. Пленки равны по толщине.
- Г. На вопрос нельзя ответить.
- Д. Нет верного ответа.

*Творческие задания*

Выполняются дома

1. Исследовать поток ИК-излучения пульта дистанционного управления телевизором. Какова форма потока этого излучения? Как экспериментально доказать, что поток излучения отражается от некоторых материалов (белый экран, металл и др.)? Проходит ли ИК-излучение через стекло, эбонит, воду? Как доказать, что это излучение модулируется? Как экспериментально доказать, что это излучение не видимый свет, не УФ-излучение?

# Основные положения специальной теории относительности



## Изучив эту тему,

- вы узнаете, что свойства пространства и времени не абсолютны, а определяются системой отсчета, выбранной наблюдателем;
- поймете, что скорость света является инвариантом для любых систем отсчета;
- научитесь рассчитывать релятивистские эффекты с помощью уравнений Лоренца

## Основные понятия:

Инерциальная система отсчета • Событие • Постулат • Собственное время • Масса покоя • Инвариант • Принцип относительности • Мировая линия • Принцип причинности • Релятивистские эффекты • Энергия покоя

## 1. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СТО

*Конспект.  
Таблицы. Схемы*

В начале XX в. возникла новая физическая теория — специальная теория относительности (СТО). Она уточнила и углубила наши представления о свойствах пространства и времени, ответила на принципиальные вопросы о познании физических явлений в разных инерциальных системах отсчета.

Методология — это наука, которая занимается вопросами методов научного познания. При разработке любой новой физической теории ученые опираются на какие-то общие идеи и методы. Сформулируем важнейшие положения, которые послужили основанием для поиска новых физических закономерностей.

1. Для начала введем основные понятия, которые используются в специальной теории относительности.

**Инерциальная система отсчета (ИСО)** — это система отсчета (система координат, тело отсчета и часы), относительно которой свободное тело движется прямолинейно и равномерно или покоится. ИСО — это абстракция, идеальный объект, объект науки, средство описания явлений.

**Событие** — это любое физическое явление, происходящее в определенной точке пространства относительно любой ИСО в какой-то момент времени. Событие — идеальное понятие.

**Постулат** — исходное положение, утверждение, принимаемое без строгого доказательства, но обоснованное, например, экспериментами.

**Собственной инерциальной системой отсчета** называют систему отсчета, относительно которой тело покоится. Время движения тела, измеренное в такой системе, называют **собственным временем**. Массу тела, измеренную в такой системе, называют **массой покоя**.

**Инвариант (inv)** — величина, независимая от выбора системы ИСО. Как далее узнаем, например это скорость света. Событие — тоже инвариант.

Другие понятия будут введены по мере рассмотрения материала.

2. Ранее было выяснено, что не имеет смысла говорить о механическом движении вообще. Для определения и изучения движения необходимо выбрать систему отсчета. Самая «удобная» из систем отсчета. — **инерциальная система отсчета**. В ней независимо действующее тело движется прямолинейно равномерно или покоится. По определению, ИСО — множество: если есть одна, то любая другая система отсчета, движущаяся относительно первой прямолинейно и равномерно, тоже инерциальная. Естественно, перед учёными встала задача: как описывать явления в разных ИСО.

Для ответа еще в XVII в. Г. Галилеем был сформулирован один из важнейших принципов физики — **принцип относительности**. Он утверждает равноправие инерциальных систем отсчета, т. е. все физические явления при равных начальных условиях протекают одинаково во всех инерциальных системах. А раз так, то и описываются явления одинаково (одинаковыми законами) в разных ИСО.

При переходе от описания движения тела в одной ИСО  $K$  к описанию в другой ИСО  $K^*$

(рис. 120), в частности, используется закон Галилея о сложении скоростей:

$$\vec{v} = \vec{v}^* + \vec{V}.$$

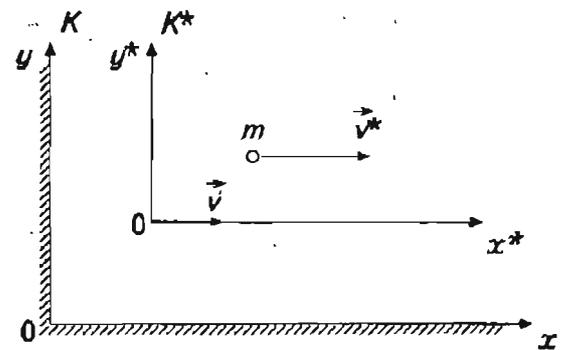


Рис. 120

И все было хорошо до открытия и изучения электромагнитных волн. В ходе различных экспериментов ученые пришли к выводу о том, что скорость электромагнитных волн в вакууме постоянна и конечна вне зависимости от выбора ИСО. Абсолютность (инвариантность) скорости света вступила в противоречие с классическим законом сложения скоростей. Возникла научная проблема: *справедлив ли принцип относительности?*

3. Со времен Ньютона утвердились представления об абсолютности свойств пространства и времени. Пространство во всех точках и по всем направлениям имеет одинаковые свойства, время во всех точках течет одинаково и не зависит от движения тела. До Эйнштейна время и измерение времени были отделены друг от друга. Но выбор ИСО, измерение длины и времени — осуществляются в ходе физических экспериментов. Поскольку все измерения дают неточные значения физических величин, то значит на практике реально существует неточность в выборе ИСО, в определении параметров тела и времени события. И вообще, все числа, которыми оперирует физика, — числа приближенные. Значит, *свойства пространства и времени, во-первых, не так уж абсолютны, во-вторых, определяются в конкретных экспериментах.*
4. Для этих конкретных экспериментов принципиальным и жестким ограничением явилась **конечность и предельность скорости света**. В природе не оказалось взаимодействий, которые осуществлялись бы с большей скоростью. Для того чтобы на опыте убедиться в одинаковости

хода времени в двух разделенных областях пространства, необходимо сравнить ход часов в этих областях — *синхронизировать часы*.

Очевидно, это проще всего сделать с помощью светового сигнала. Мысленно выполним наблюдение за этим процессом с точки зрения двух ИСО —  $K^*$ , в которой вагон неподвижен, и  $K$ , относительно которой ИСО  $K^*$  и, естественно, вагон движется (рис. 121). В середине вагона в точке  $S$  происходит вспышка света.

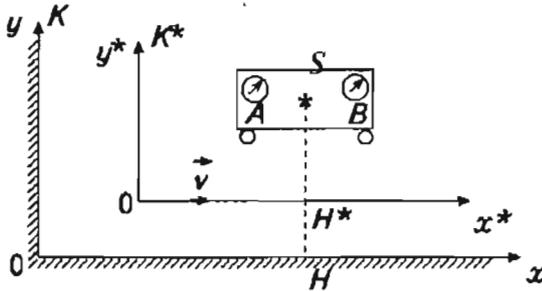


Рис. 121

В первом случае (ИСО  $K^*$ ) свет одновременно достигает часов, их включают (синхронизируют), и они идут. Если, например через час при такой синхронизации показания часов будут одинаковы, то время в этих точках (областях) течет одинаково. Во втором случае (ИСО  $K$ ) наблюдатель  $H$ , относительно которого вагон движется, видит, что до часов  $A$  свет дошел раньше, чем до часов  $B$ . Относительно данного наблюдателя  $H$  вагон движется, и точка  $A$  (и часы) приближается к месту вспышки, а часы  $B$  — удаляются. Вывод принципиально важен: **одновременность пространственно разделенных событий относительна**. С точки зрения наблюдателя в одной ИСО события одновременны, с точки зрения другого наблюдателя в другой ИСО эти же события произошли не одновременно.

Событие в любой ИСО характеризуется числами —  $x, y, z, t$ . Таким образом, в пространстве-времени событие изображается точкой, а явление (даже покой) — линией, называемой **мировой линией**. На рис. 122 изображена система отсчета для случая  $x = 0, y = 0$ .

Пусть в начале координат происходит событие  $O$ . Мировые линии светового сигнала (два сигнала в противоположных направлениях) изображены наклонными. Раз нет взаимодействия, которое бы распространялось со скоростью,

большой скорости света, то событие  $A$  всегда предшествует событию  $O$ , а событие  $B$  произошло после события  $O$ . И, в принципе, они могут быть причинно связаны между собой. Нельзя подобрать ИСО, в которой это было бы не так.

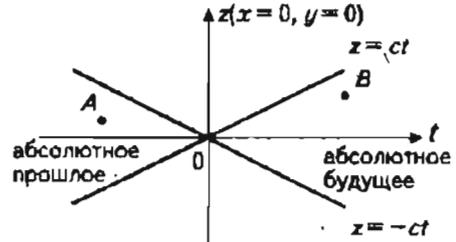


Рис. 122

5. В механике Ньютона при мгновенной скорости распространения взаимодействий одно тело причинно связано с любым другим телом, на которое может действовать. В специальной теории относительности ситуация другая: если между событиями (т. е. явлениями в данной точке пространства, в данный момент времени) в двух разделенных областях прошло меньше времени, чем требуется свету для прохождения между этими точками, то *такие события в принципе не могут быть причинно связаны между собой*. Таким образом, СТО существенно обогащает наши представления о взаимосвязи явлений в мире.

Вопросы для повторения. Существуют ли в природе инерциальные системы отсчета? Что такое событие в СТО? Может ли событие в одних ИСО быть, а в других ИСО — нет? Как на практике устанавливают одновременность пространственно разделенных событий? Какой фундаментальный экспериментальный факт «потребовал» уточнения классических представлений о пространстве и времени?

### Кинематика СТО

В кинематике СТО выясняется связь между длиной, временем, скоростью, измеренными в собственной системе отсчета и в движущейся инерциальной системе отсчета.

1. Длина стержня  $l$ , измеренная в ИСО, относительно которой стержень движется со скоростью  $u$ , будет равна:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}},$$

где  $l_0$  — собственная длина стержня.

Из формулы видно, что длина стержня  $l$ , измеренная в ИСО, относительно которой он движется, будет меньше собственной длины стержня. Важно подчеркнуть, что во множестве равноправных ИСО будем иметь у одного и того же стержня множество значений длины.

Великий физик-теоретик XX века, создатель специальной теории относительности А. Эйнштейн (1879–1955) писал:

«Чисто логическое мышление само по себе не может дать никаких знаний о мире фактов, все познание реального мира исходит из опыта и завершается им. Полученные чисто логическим путем положения ничего не говорят о действительности. Галилей стал отцом современной физики и вообще современного естествознания именно потому, что понял эту истину и внул ее научному миру.»

Трудный вопрос: можно ли с этой точки зрения считать чисто логическим теоретическое мышление, осуществляемое, например по схеме «факты–модель–следствия»? Опирался ли сам Эйнштейн на факты при создании СТО? Какие это могли быть факты?

2. Пусть между двумя событиями в собственной системе отсчета, где события происходят в одной точке, прошло время  $t_0$ , тогда в движущейся относительно нее со скоростью  $v$  ИСО интервал времени между этими же событиями уже будет выражаться так:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Таким образом, в ИСО, движущейся относительно собственной системы отсчета, интервал времени между событиями увеличивается, время течет быстрее. Причем это зависит от скорости самой системы отсчета. Поскольку равноправных ИСО множество, движутся они с самыми разными скоростями, то и время между двумя событиями с точки зрения этих ИСО будет самое разное. Парадоксально, но факт: в СТО время между двумя событиями относительно. Его величина зависит от выбора ИСО.

Явления сокращения размеров тела и замедления времени получили названия **релятивистских эффектов**. Это чисто кинематические эффекты. Они не вызваны какими-либо материальными причинами.

Хотя время между двумя событиями и длина отрезка (стержня) относительно, т. е. различны в

разных ИСО, имеется и *инвариантная характеристика*. Она называется **интервал S**. Его можно определить следующим образом. Возводим в квадрат формулу для времени тела:

$$t^2 \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right) = t_0^2 \text{ или} \\ t^2 c^2 - t^2 v^2 = t_0^2 c^2 = \text{inv},$$

так как скорость света и собственное время — инвариантные величины. По смыслу  $vt$  — расстояние  $R$ , на которое переместилась частица. Вводим обозначения и получаем:

$$S^2 = -c^2(t_2 - t_1)^2 + R^2.$$

3. Новый закон сложения скоростей формулируется в СТО так:

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{vu'}{c^2}}$$

где  $u$  — скорость тела в ИСО  $K$ ,  $u'$  — скорость тела в ИСО  $K^*$ ,  $v$  — скорость ИСО  $K^*$  относительно ИСО  $K$  (рис. 123).

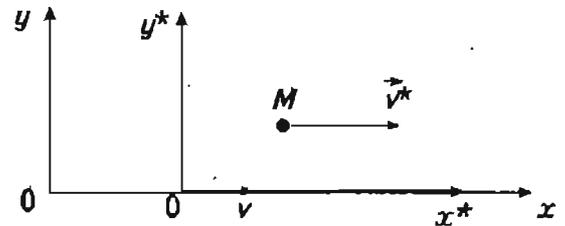


Рис. 123

Покажем, что формула сложения скоростей согласуется с постоянством скорости света в любой ИСО. Пусть в ИСО  $K^*$ , движущейся со скоростью  $u$ , распространяется электромагнитная волна со скоростью  $c$ . Определим скорость электромагнитной волны относительно ИСО  $K$ .

Получаем:  $u = c \frac{c+v}{c+v} = c$ , что и требовалось показать.

### Динамика СТО

В СТО содержание основных понятий, динамики: массы, импульса, энергии — обогащается.

1. В системе отсчета, в которой тело покоится, его массу называют **массой покоя** и обозначают  $m_0$ . Масса этого же тела в ИСО, относительно которой оно движется со скоростью  $v$ , определяется по формуле:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

При увеличении скорости тела (или скорости системы отсчета, относительно которой тело изучают) его масса возрастает (рис. 124).

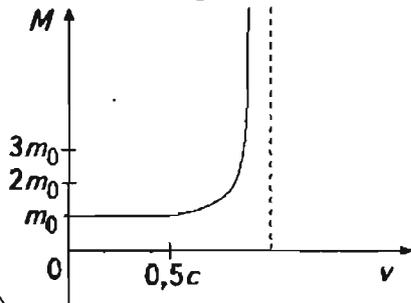


Рис. 124

Отсюда и импульс свободного тела (частицы) определяется уже по-другому:

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

5. Основной закон релятивистской динамики приобретает вид:

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}$$

По мере увеличения скорости инертные свойства тела  $m$  возрастают (рис. 123) и для изменения импульса тела требуется все большая сила. В пределе — бесконечная. Вот почему невозможно разогнать тело до скорости света.

6. На основе постулатов СТО Эйнштейн получил формулу связи массы и энергии свободного тела (частицы):

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Таким образом, во всех процессах, какие бы преобразования энергии и массы физической системы ни происходили, между ними всегда сохраняется соотношение  $E = mc^2$ . В системе отсчета, в которой тело покоится, его энергия будет  $E = m_0 c^2$ . Эта энергия называется энергией покоя. Таким образом, СТО дает возможность определить собственную энергию тела.

Другое фундаментальное соотношение релятивистской механики для взаимосвязи энергии и импульса имеет вид:

$$E^2 = c^2 p^2 + c^4 m_0^2$$

Данное соотношение справедливо во всех ИСО, т. е. является инвариантом.

7. Закон сохранения энергии тела (частицы) выполняется и в СТО только в измененном виде:
- $$mc^2 + U = \text{const.}$$

### Принцип соответствия

Создание специальной теории относительности не разрушило классической механики. При скоростях движения тела много меньших скорости света (что чаще всего мы и наблюдаем) формулы СТО дают те же результаты. Покажем это.

1. Если  $c \gg v$ , то релятивистская формула сложения скоростей переходит в формулу Галилея: из

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{vu'}{c^2}}$$

получаем  $u \approx u' + v$ . Классический за-

кон сложения скоростей выполняется тем точнее, чем скорость света больше скорости тела (или скорости системы отсчета).

2. В формуле для релятивистской массы при скоростях движения значительно меньших скорос-

ти света, выражение  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  примерно равно 1.

При таком условии  $m \approx m_0$ . По рис. 124 видно, что масса тела заметно возрастает при скоростях движения тела больших  $0,5c$ .

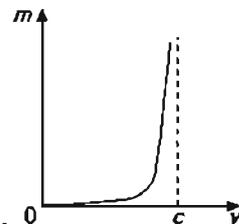
3. При  $c \gg v$  формула релятивистского импульса переходит в классическую:  $p = mv$ . Уравнение релятивистской динамики при малых скоростях движения тела с большой точностью переходит в уравнение второго закона Ньютона.

Великий французский ученый, один из основателей специальной теории относительности, Анри Пуанкаре (1854–1912) писал:

«...несмотря на большое значение аргументов и фактов, выдвинутых против классической механики, было бы преждевременно рассматривать ее как окончательно осужденную. Как бы то ни было, она во всяком случае остается механикой скоростей, очень малых по сравнению со скоростью света, остается, таким образом, механикой нашей практической жизни и нашей земной техники.»

Вопрос: почему СТО редко используется на практике, хотя выбор ИСО, в том числе и движущихся с большими скоростями, за нами?

Систематизация знаний СТО приведена в табл. 11.

<b>СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ</b>	
Специальная теория относительности (СТО) — физическая теория, изучающая пространственно-временные закономерности материального мира	
<b>Постулаты</b>	
Процессы природы протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета (законы физики имеют одинаковую форму во всех ИСО)	
Во всех ИСО скорость света в вакууме является предельной скоростью и не зависит от скорости движения источника и наблюдателя	
Кинематика	Динамика
<p>1. При переходе от описания движения в ИСО <math>K'</math> (ее скорость <math>v</math>) к ИСО <math>K</math> используются преобразования Лоренца:</p> $x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ <p>2. Во всех ИСО инвариантна величина: <math>l^2 - c^2t^2 = l'^2 - c^2t'^2</math></p> <p>3. Относительность расстояний <math>l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}</math></p> <p>где <math>l_0</math> — длина стержня в ИСО, в которой он покоится</p> <p>4. Относительность промежутков времени:</p> $\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ <p>5. Формула сложения скоростей:</p> $v_2 = \frac{v_1 + v}{1 + \frac{v_1 v}{c^2}}$	<p>1. <math>\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}</math> — релятивистская форма второго закона динамики, где <math>m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}</math></p>  <p>2. Взаимосвязь массы и энергии:  <math>E = mc^2</math>          Энергия покоя:  <math>E_0 = m_0 c^2</math></p> <p>3. <math>E = p^2 c^2 + m_0^2 c^4</math></p>

Важно помнить, что новая теория заменила классическую механику в случае рассмотрения движения тела со скоростями, сравнимыми со скоростью света. А поскольку скорость тела связана с выбором ИСО, то и возникает потребность знать правила преобразования координат при переходе из одной ИСО в другую — преобразования Лоренца.

#### *Самостоятельная работа*

Инвариантная, т. е. не зависящая от выбора ИСО величина, — весьма важная характеристика явления. Она просто удобна при описании явлений. Поэтому ниже приведены лишь задачи на выяснение инвариантных характеристик.

1. Является ли событие, с точки зрения СТО, инвариантом? Что это практически значит?
2. Какие эксперименты послужили основой для гипотезы об инвариантности скорости света?
3. Докажите, что величина  $S^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2$  является инвариантом, т. е. не зависит от выбора ИСО.
4. Доказать, что из закона сложения скоростей в СТО следует, что скорость света — инвариант. Две частицы движутся навстречу друг другу со скоростями  $v_1$  и  $v_2$ . Доказать, что скорость их сближения не является инвариантом.
5. Является ли инвариантом внутренняя энергия тела? Как обосновать ответ? Является ли электрический заряд инвариантной величиной? Является ли масса инвариантной величиной?

# *Геометрическая оптика*



### Изучив эту тему,

- ♦ узнаете законы отражения и преломления света, формулы линзы и сферического зеркала;
- ♦ поймете причину образования тени и полутени, солнечного затмения, близорукости и дальнозоркости; принцип действия фотоаппарата, лупы и микроскопа;
- ♦ научитесь проверять справедливость закона прямолинейного распространения света; получать тень; строить изображение предмета; решать задачи с использованием законов отражения, преломления света, формулы линзы и сферического зеркала.

### Основные понятия:

- ♦ Световой луч ♦ Зеркальное отражение ♦ Диффузное отражение света ♦ Абсолютный показатель преломления ♦ Полное отражение света ♦ Линза ♦ Оптическая сила линзы ♦ Близорукость ♦ Дальнозоркость

*Конспект.  
Таблицы. Схемы*

## Прямолинейное распространение света

**Закон прямолинейного распространения света.**  
*В прозрачной однородной среде свет распространяется прямолинейно.* Следствием проявления закона прямолинейного распространения света является образование тени и полутени (рис. 1, 2).

При описании многих явлений, связанных с распространением световых волн (электромагнитных волн видимого диапазона) используется геометрическое представление — световой луч (рис. 3). Световым лучом называется бесконечно узкий пучок световых волн, совпадающий с направлением распространения волны.

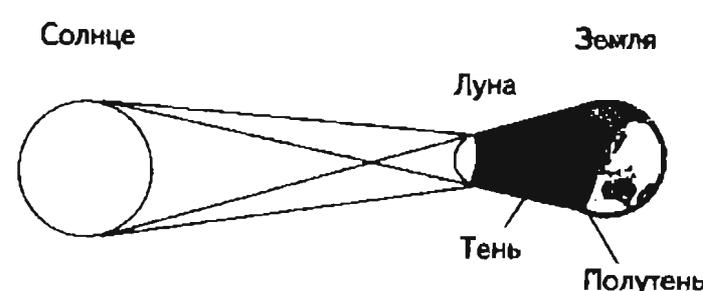
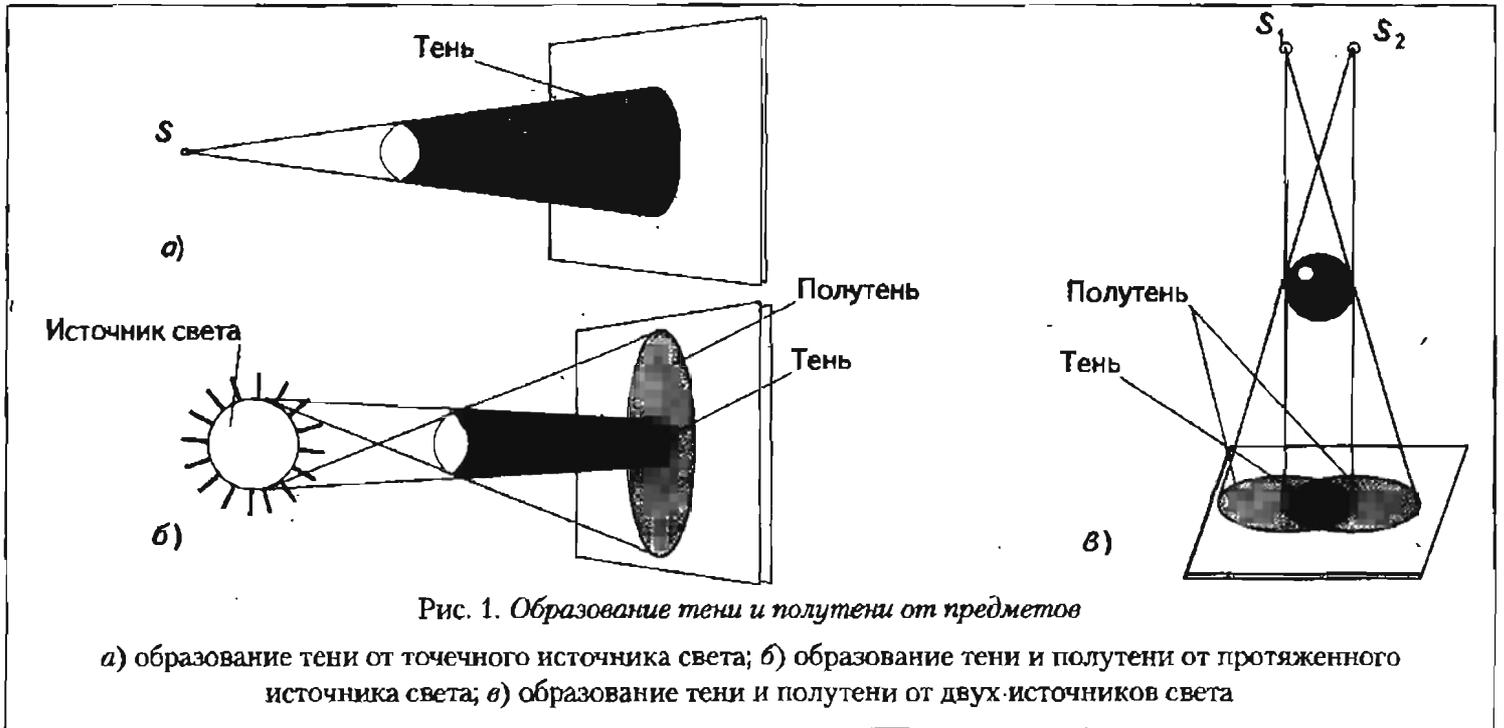


Рис. 2. Солнечное затмение

Световая волна, падающая на поверхность раздела двух сред, частично отражается от нее, возвращаясь в первую среду, частично проходит во вторую.

**Отражение света.** Падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точку падения луча, лежат в одной плоскости (рис. 4). Угол отражения равен углу падения.

$$\angle \alpha = \angle \beta$$

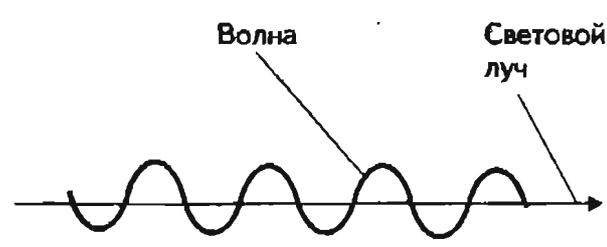
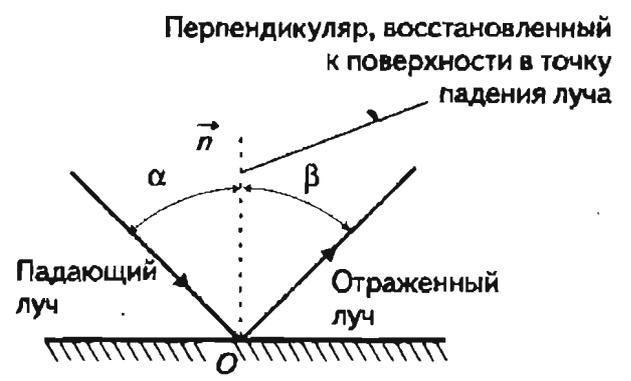
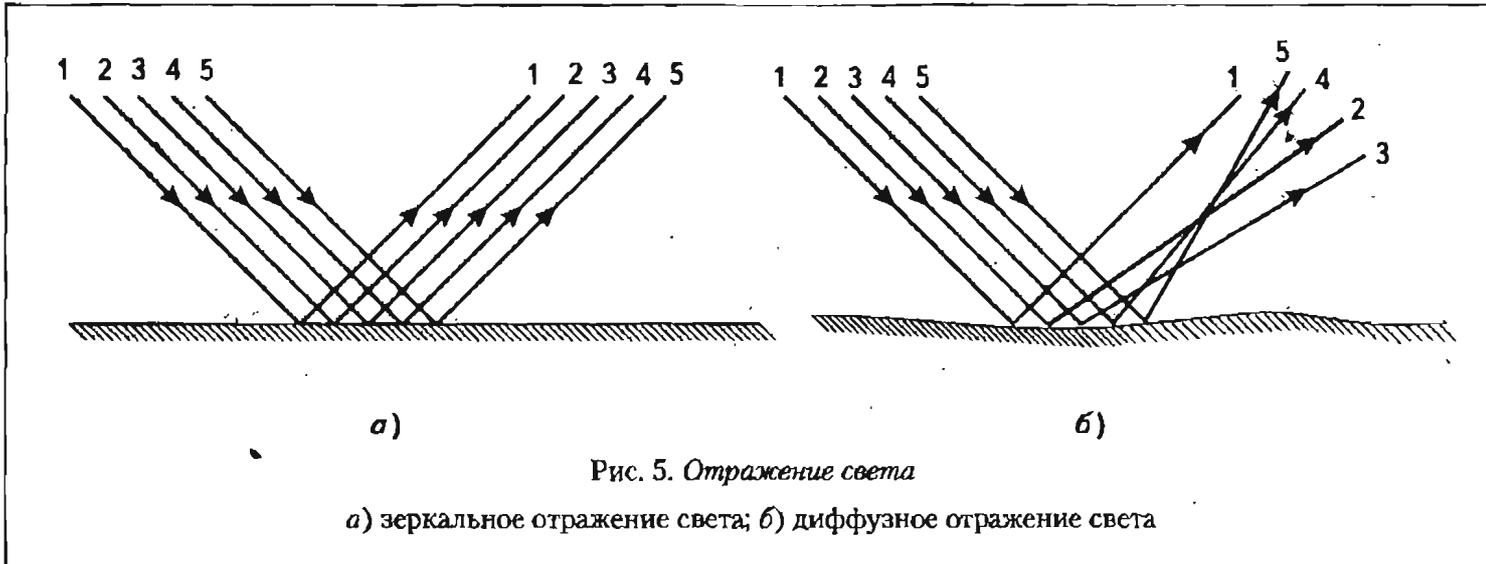


Рис. 3. Световой луч



$\alpha$  - угол падения  $\beta$  - угол отражения

Рис. 4. Закон отражения света



Отражение света может быть зеркальным или диффузным (рассеянным) (рис. 5).

Если лучи, падающие на поверхность раздела двух сред параллельным пучком, после отражения остаются параллельными, то отражение называется **зеркальным**, а сама поверхность — **плоским зеркалом** (рис. 5, а).

Если пучок параллельных лучей, падающих на поверхность, после отражения не является пучком параллельных лучей, то отражение называется **диффузным** или **рассеянным** (рис. 5, б).

### Преломление света

1. *Луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный в точку падения луча, лежат в одной плоскости.*

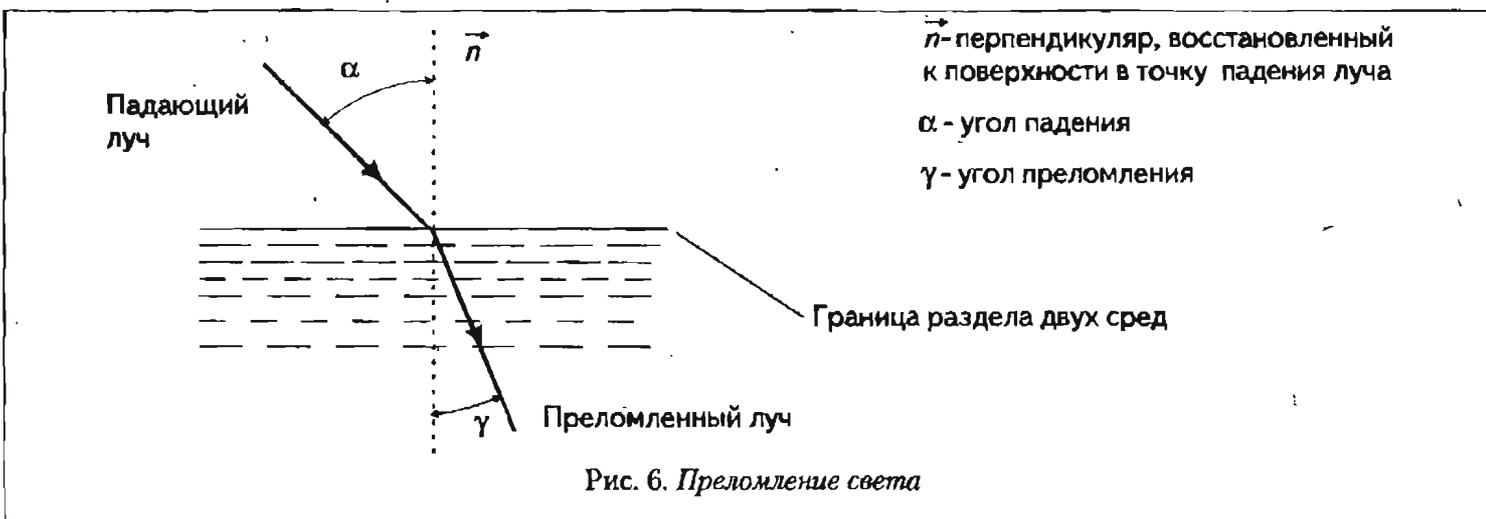
2. *Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред: оно равно отношению абсолютного показателя преломления второй среды к абсолютному показателю преломления первой среды.*

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

$n_1$  — абсолютный показатель преломления первой среды.

$n_2$  — абсолютный показатель преломления второй среды.

**Абсолютный показатель преломления** — показатель преломления при переходе светового луча из вакуума или воздуха в данное вещество.



$\vec{n}$  — перпендикуляр, восстановленный к поверхности в точку падения луча

$\alpha$  — угол падения

$\gamma$  — угол преломления

Граница раздела двух сред

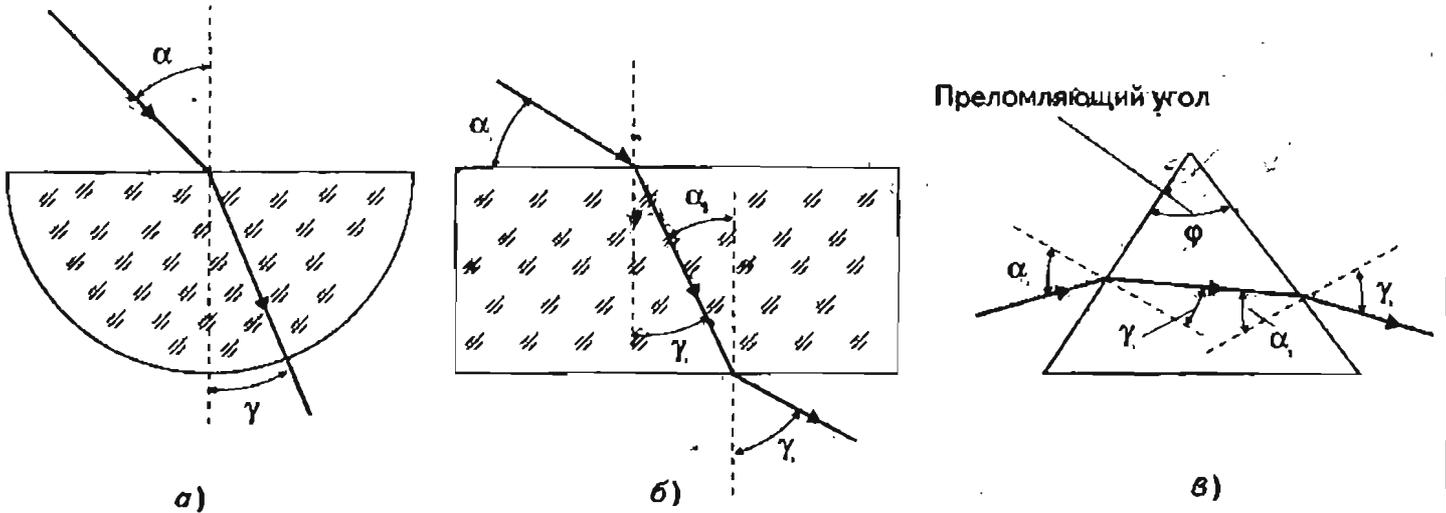
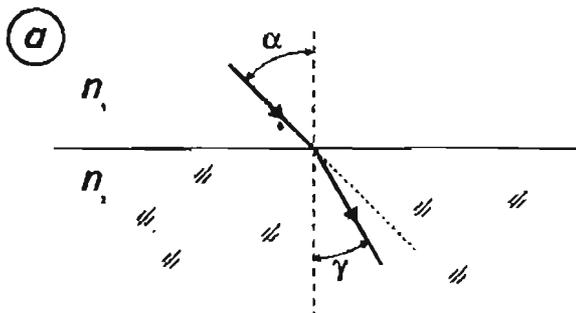
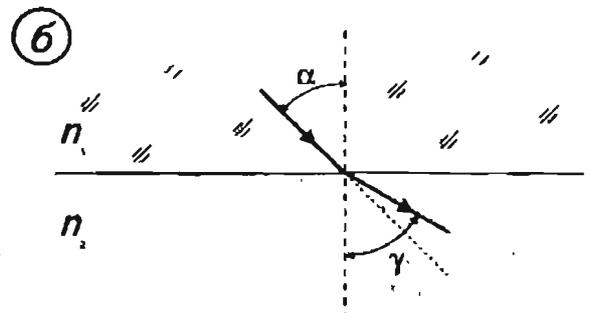


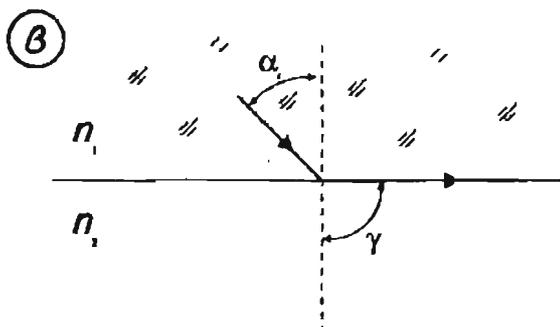
Рис. 7. Ход светового луча через  
 а) полуцилиндр, б) плоскопараллельную пластину, в) трехгранную призму



Если  $n_1 < n_2$ , то  $\angle \alpha > \angle \gamma$  и луч отклоняется от своего первоначального направления к перпендикуляру



Если  $n_1 > n_2$ , то  $\angle \alpha < \angle \gamma$  и луч отклоняется от своего первоначального направления к границе раздела двух сред



Если  $n_1 > n_2$ , то может наблюдаться полное отражение света. Преломленный луч скользит по границе раздела двух сред

$\alpha_0$  - предельный угол падения

$\angle \gamma = 90^\circ$

Рис. 8. Ход светового луча при переходе из сред разной оптической плотности

а) переход светового луча из среды оптически менее плотной в среду оптически более плотную; б) и в) переход светового луча из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную

### Полное отражение света

**Полное отражение света** наблюдается при переходе света из оптически более плотной среды в среду оптически менее плотную в том случае, если все лучи падают под углом, большим предельного. **Предельный угол падения** — угол, при котором преломленный луч скользит по границе раздела двух сред (рис. 8, в).

Полное отражение света проявляется на границе воздушных пузырьков в воде, в блеске капель росы в солнечном свете, в блеске драгоценных камней, в образовании миражей. Это явление используется при изготовлении прямоугольных призм полного отражения. Оно также применяется в волоконной оптике.

### Линзы

**Линзой** или **оптическим стеклом** называется прозрачное для света отшлифованное тело, ограниченное кривыми поверхностями, в частности, одна из поверхностей может быть плоской.

По форме ограничивающих поверхностей линзы могут быть сферическими, цилиндрическими и др. **Сферическими** называются линзы, ограниченные с двух или с одной стороны сферическими поверхностями. На рис. 9 представлены сферические линзы: собирающая линза (рис. 9 а) и рассеивающая линза (рис. 9 б). Точка  $O$  — **оптический центр** линзы;  $C_1$  и  $C_2$  — **центры сферических поверхностей**.

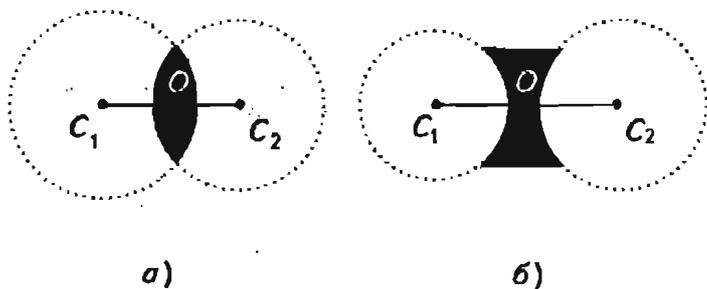


Рис. 9. Сферические линзы

На рис. 10 и 11 показаны некоторые виды собирающих и рассеивающих линз и их условные обозначения. На рис. 12 представлен ход лучей через собирающую и рассеивающую линзу.



Рис. 10. Внешний вид и условное обозначение собирающей линзы

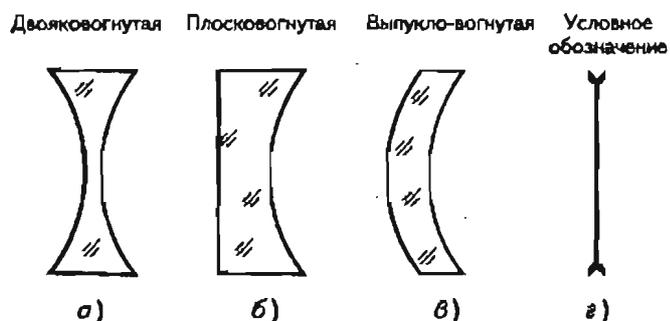


Рис. 11. Внешний вид и условное обозначение рассеивающей линзы

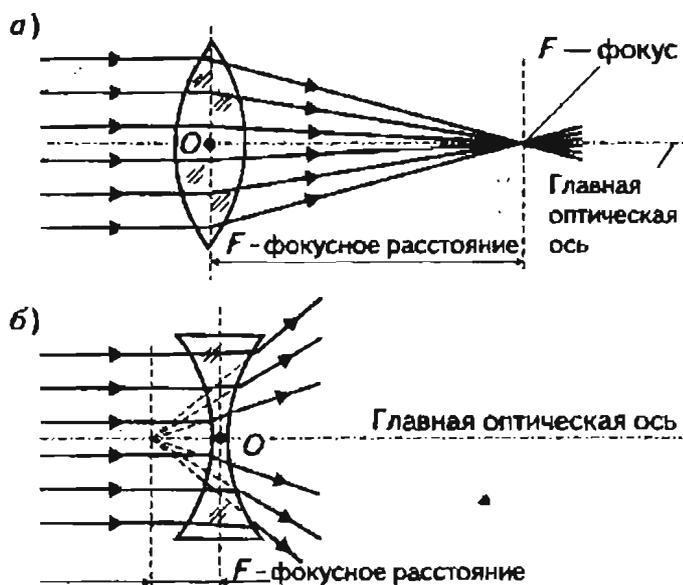


Рис. 12. Ход лучей в линзах:  
а) ход лучей в собирающей линзе;  
б) ход лучей в рассеивающей линзе

У собирающей линзы два фокуса и оба действительных. У рассеивающей линзы два фокуса и оба мнимых.

## Основные формулы и соотношения

### Формула линзы:

$$\frac{1}{F} = \left( \frac{n_n}{n_{\text{ср}}} - 1 \right) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Где:  
 $n_n$  — абсолютный показатель преломления материала, из которого изготовлена линза;  
 $n_{\text{ср}}$  — абсолютный показатель преломления среды, в которой находится линза;  
 $R_1$  и  $R_2$  — радиусы кривизны сферических поверхностей.

$R > 0$  для выпуклой поверхности;  $R < 0$  для вогнутой поверхности,  $R = \infty$  для плоскости.

### Формула тонкой линзы:

$$\frac{1}{d} \pm \frac{1}{f} = \pm \frac{1}{F}$$

$$\frac{1}{d} \pm \frac{1}{f} = \pm D$$

Где:  
 $d$  — расстояние от предмета до оптического центра линзы, считая по главной оптической оси;  
 $f$  — расстояние от изображения предмета до оптического центра линзы, считая по главной оптической оси;  
 $F$  — фокусное расстояние линзы;  
 $D$  — оптическая сила линзы.

$$[d] = \text{м} \quad [f] = \text{м}$$

$$[F] = \text{м} \quad [D] = \frac{1}{\text{м}} = \text{дптр (диоптрия)}$$

### Линейное увеличение или уменьшение, даваемое линзой:

$$\Gamma = \frac{|f|}{d} = \frac{h}{H}$$

Где:  
 $h$  — линейные размеры изображения;  
 $H$  — линейные размеры предмета.

### Формула сферического зеркала:

$$\frac{1}{d} \pm \frac{1}{f} = \pm \frac{1}{F}$$

Где:  
 $d$  — расстояние от полюса зеркала до предмета, считая по главной оптической оси;  
 $f$  — расстояние от полюса зеркала до изображения, считая по главной оптической оси;  
 $F$  — фокусное расстояние зеркала;  $F = \frac{R}{2}$  (фокусное расстояние равно половине радиуса зеркала).

### Линейное увеличение или уменьшение, даваемое сферическим зеркалом:

$$\Gamma = \frac{|f|}{d} = \frac{h}{H}$$

Где:  
 $h$  — линейные размеры изображения;  
 $H$  — линейные размеры предмета.

### Для оптической системы:

$$D = \pm D_1 \pm D_2 \pm D_3 \pm \dots \pm D_n$$

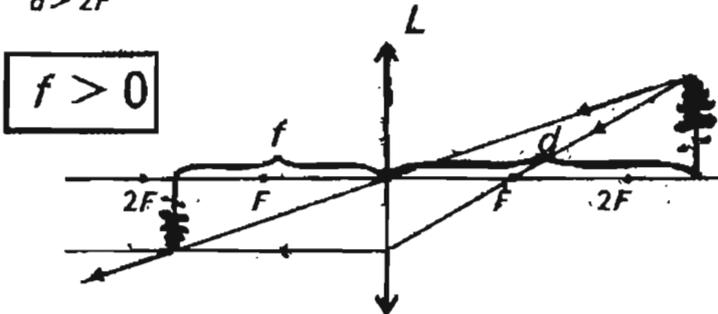
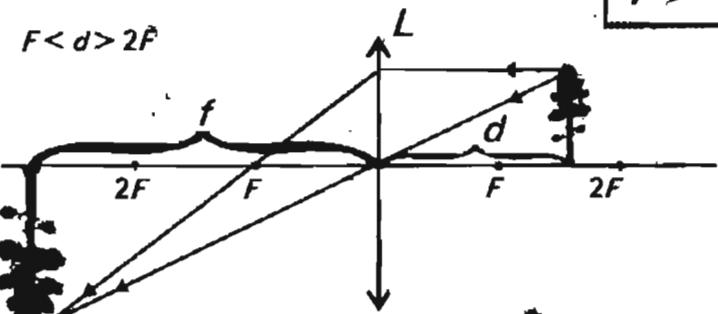
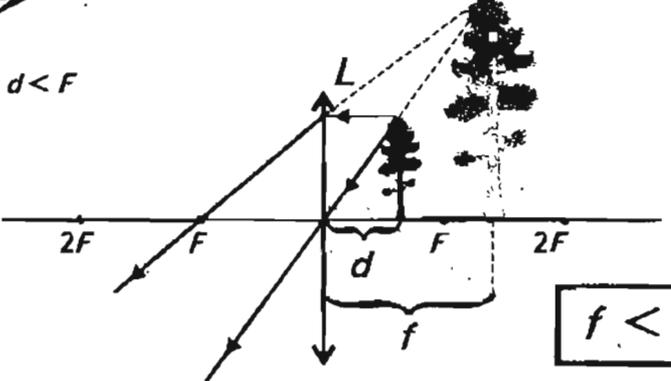
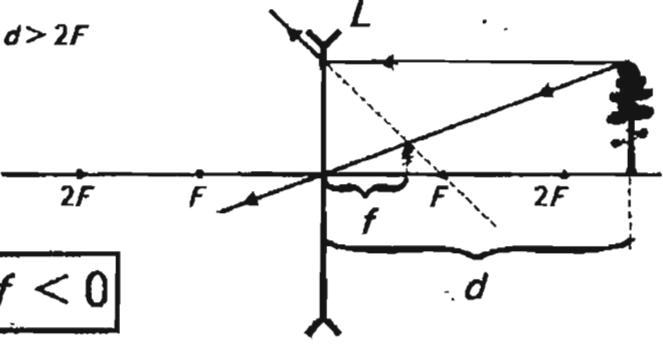
Гюйгенс Христиан (1629 — 1695) — голландский физик, математик и астроном. В своем труде «Трактаты о свете» (1690 г.) вывел законы отражения и преломления; объяснил особенности двойного лучепреломления. Усовершенствовав технику шлифования стекол, он создал линзы с громадными фокусными расстояниями (в том числе 54 и 63 м). Гюйгенс работал над усовершенствованием телескопа, разработал окуляр (окуляр Гюйгенса), который используется до настоящего времени. С помощью телескопа обнаружил полярные шапки на Марсе, полосы на Юпитере, туманности в созвездии Ориона.



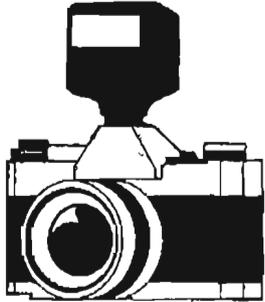
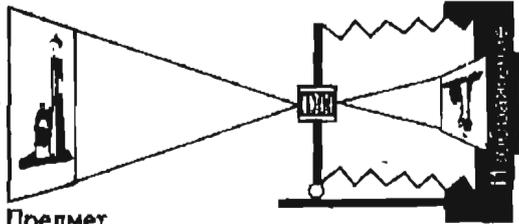
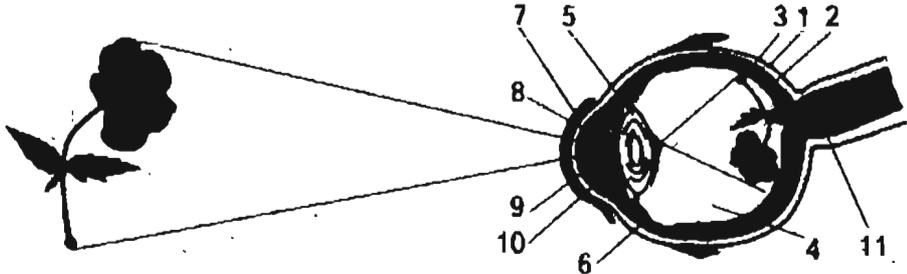
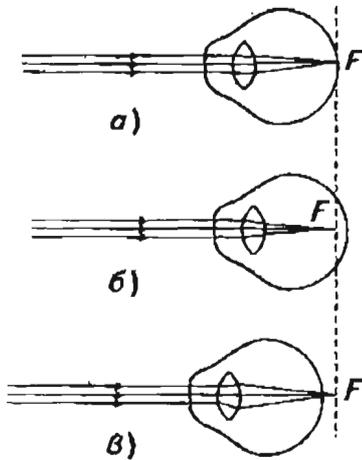
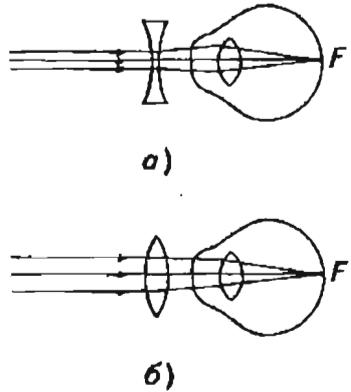
**ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

Оптическая система	Построение изображения	Характер изображения
Плоское зеркало	<p>Плоское зеркало</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Изображение мнимое</li> <li>2. Расстояние от изображения до плоскости зеркала равно расстоянию от этой плоскости до предмета</li> <li>3. Изображение протяженного предмета всегда равно самому предмету и расположено симметрично ему относительно плоскости зеркала</li> </ol>
Сферическое зеркало	<p>а) <math>d &gt; 2F</math> <math>f &gt; 0</math></p> <p>б) <math>F &lt; d &lt; 2F</math> <math>f &gt; 0</math></p> <p>в) <math>d &lt; F</math> <math>f &lt; 0</math></p> <p>г) <math>f &lt; 0</math></p>	<p><b>Вогнутое зеркало:</b></p> <p>а) изображение действительное, обратное (перевернутое) и уменьшенное <math>F &lt; f &lt; 2F</math></p> <p>б) изображение действительное, обратное и увеличенное <math>f &gt; 2F</math></p> <p>в) изображение мнимое, прямое и увеличенное</p> <p><b>Выпуклое зеркало:</b></p> <p>г) изображение мнимое, прямое и уменьшенное</p>

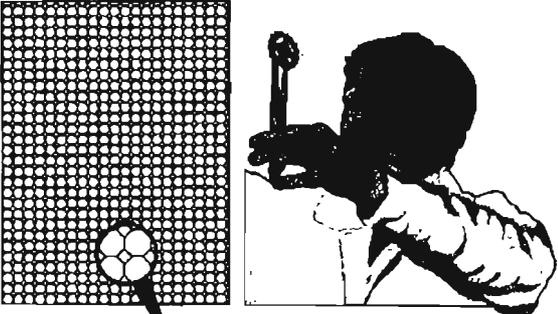
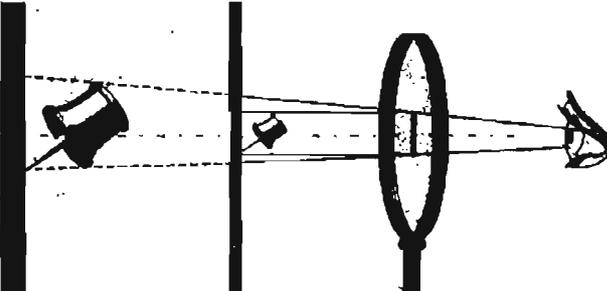
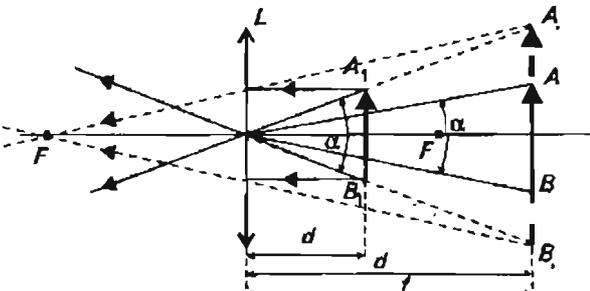
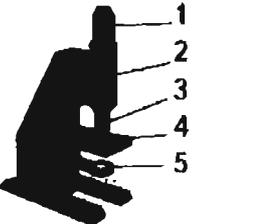
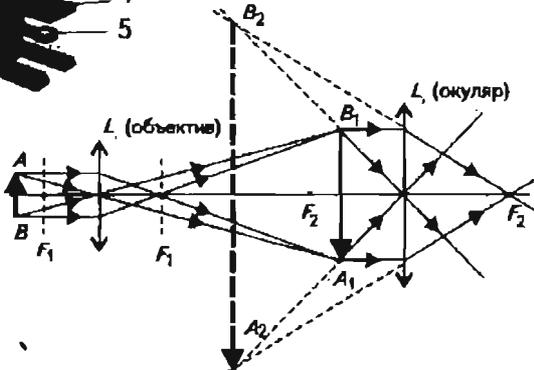
**ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

Оптическая система	Построение изображения	Характер изображения
Линзы	<p>а) <math>d &gt; 2F</math></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"><math>f &gt; 0</math></div> 	<p><b>Собирающая линза:</b></p> <p>а) изображение действительное, обратное (перевернутое) и уменьшенное <math>F &lt; f &lt; 2F</math></p>
	<p>б) <math>F &lt; d &lt; 2F</math></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"><math>f &gt; 0</math></div> 	<p>б) изображение действительное, обратное и увеличенное <math>f &gt; 2F</math></p>
	<p>в) <math>d &lt; F</math></p>  <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"><math>f &lt; 0</math></div>	<p>в) изображение мнимое, прямое и увеличенное (находится с той же стороны, что и предмет) <math>f &lt; 0</math></p>
	<p>г) <math>d &gt; 2F</math></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"><math>f &lt; 0</math></div> 	<p><b>Рассеивающая линза:</b></p> <p>г) изображение мнимое, прямое и уменьшенное; всегда находится с той же стороны, что и предмет</p>

**ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ**

Оптическая система	Внешний вид прибора или схема устройства	Построение изображения, даваемого прибором
Фотоаппарат		<p>Изображение действительное, уменьшенное и обратное (перевернутое)</p>  <p>Предмет</p>
Глаз	 <p>Схема строения глаза человека и изображение предметов на сетчатке (изображение действительное, уменьшенное и обратное)</p> <p>1 - белочная наружная оболочка; 2 - сосудистая оболочка; 3 - сетчатка; 4 - стекловидное тело; 5 - хрусталик; 6 - ресничная мышца; 7 - роговица; 8 - радужная оболочка; 9 - зрачок; 10 - водянистая влага (передняя камера); 11 - зрительный нерв</p>	
	<p><b>Положение изображения</b></p>  <p>а) Нормальный глаз (на сетчатке)          б) Близорукий глаз (перед сетчаткой)          в) Дальнозоркий глаз (за сетчаткой)</p>	<p><b>Использование очков (линз)</b></p>  <p>а) При близорукости          б) При дальнозоркости</p>

## ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Оптическая система	Внешний вид прибора или схема устройства	Построение изображения, даваемого прибором
Лупа	 <p>Лупа - короткофокусная двояковыпуклая линза или система линз, действующих как одна собирающая лупа. Лупа предназначена для увеличения угла зрения.</p>	 <p>Рассматриваемый предмет располагается между линзой и фокусом линзы с таким расчетом, чтобы его изображение (прямое, увеличенное и мнимое) получилось на расстоянии наилучшего (ясного) зрения для нормального глаза (<math>d_0 = 25</math> см).</p>
<b>Построение изображения, даваемого лупой</b>		
		<p><math>\alpha</math> - угол, под которым виден предмет на расстоянии наилучшего зрения. (Этот угол мал. Детали предмета трудно различить)</p> <p><math>\alpha_1</math> - угол, под которым виден предмет на расстоянии <math>d_0</math>, когда ставят линзу (лупу)</p> <p>Фокусное расстояние лупы от 1 до 10 см.</p> <p>Увеличение лупы <math>\Gamma = \frac{d_0}{F}</math> ; от 2,5 до 25</p>
Микроскоп	 <p>1. Окуляр 2. Труба (тубус) 3. Объектив 4. Столик 5. Зеркало</p> 	<p>Увеличение, даваемое микроскопом, рассчитывается по формуле:</p> $\Gamma = \frac{\delta d_0}{F_1 F_2}$ <p><math>d_0</math> - расстояние наилучшего зрения для нормального глаза  <math>F_1</math> - фокусное расстояние объектива  <math>F_2</math> - фокусное расстояние окуляра  <math>\delta</math> - расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра</p> <p>Увеличение до 2500 раз          Частицы размером менее 0,3 мкм (микрона) в оптический микроскоп неразличимы из-за дифракции света</p>

## ПОКАЗАТЕЛИ ПРЕЛОМЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ВЕЩЕСТВ

Вещество	$n$	Вещество	$n$
<i>Газы и водяной пар</i>		<i>Твердые тела</i>	
Азот	1,000298	Алмаз	2,42
Водород	1,000132	Железо	1,63
Водяной пар	1,000255	Лед (в интервале температур от 0 до $-4^{\circ}\text{C}$ )	1,31
Воздух	1,000292	Медь	2,06
Кислород	1,000271	Рубин	1,76
<i>Жидкости</i>		Сахар	1,56
Ацетон	1,36	Серебро	0,18
Вода	1,33	Стекло (разные сорта)	1,5 - 1,9
Глицерин	1,47	Янтарь	1,55
Спирт метиловый	1,33		

## ПРЕДЕЛЬНЫЕ УГЛЫ ПОЛНОГО ОТРАЖЕНИЯ

Вещество	$\alpha_0$	Вещество	$\alpha_0$
Алмаз	24	Спирт	47
Бензин	45	Стекло различных сортов	30 - 42
Вода	49	Эфир этиловый	47
Глицерин	43		

*Практыкум по  
решению задач*

1. На каком расстоянии от собирающей линзы с фокусным расстоянием 20 см получится изображение предмета, если сам предмет находится на расстоянии 15 см?

Дано:  $F = 20$  см  
 $d = 15$  см  
 $f = ?$

Решение. Воспользуемся формулой тонкой линзы:

$$\frac{1}{f} + \frac{1}{d} = \frac{1}{F}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{F} - \frac{1}{d} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{d-F}{dF} \Rightarrow$$

$$f = \frac{dF}{d-F}$$

$$f = \frac{15 \cdot 20}{15 - 20} = -60(\text{см})$$

Т. к.  $f < 0$ , то изображение мнимое и располагается по ту же сторону линзы.

Ответ:  $f = -60$  см.

2. На стеклянную пластину с показателем преломления 1,5 падает световой луч (рис. 13). Каков угол падения луча, если угол между отраженным и преломленным лучами равен  $90^\circ$ ?

Дано:  $n = 1,5$   
 $\alpha - ?$

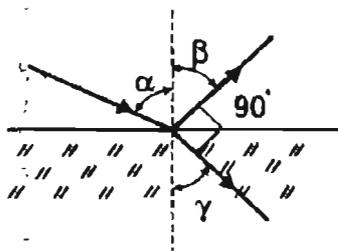


Рис. 13

Решение. Как видно из рис. 13,  $\angle \beta + \angle \gamma = 90^\circ$ . По закону отражения света  $\angle \alpha = \angle \beta$ . Следовательно:  $\angle \alpha = 90^\circ - \angle \gamma$ .

Из закона преломления света:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n$$

Но  $\sin \gamma = \cos \alpha$ , тогда:

$$\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha = n$$

Отсюда:  $\operatorname{tg} \alpha = 1,5$  и  $\alpha \approx 56^\circ$ .

Ответ: угол падения  $\alpha \approx 56^\circ$ .

3. Точечный источник света находится на глубине  $h = 20$  см (рис. 14). С помощью тонкой собирающей линзы получают уменьшенное изображение поверхности жидкости на экране, отстоящем от поверхности на расстоянии  $L = 10$  см. Фокусное расстояние линзы  $F = 1,6$  см. Определите радиус освещенного пятна на экране. Показатель преломления жидкости  $n = 1,5$ .

Дано:  $h = 20$  см  
 $L = 10$  см  
 $F = 1,6$  см  
 $n = 1,5$   
 $r - ?$

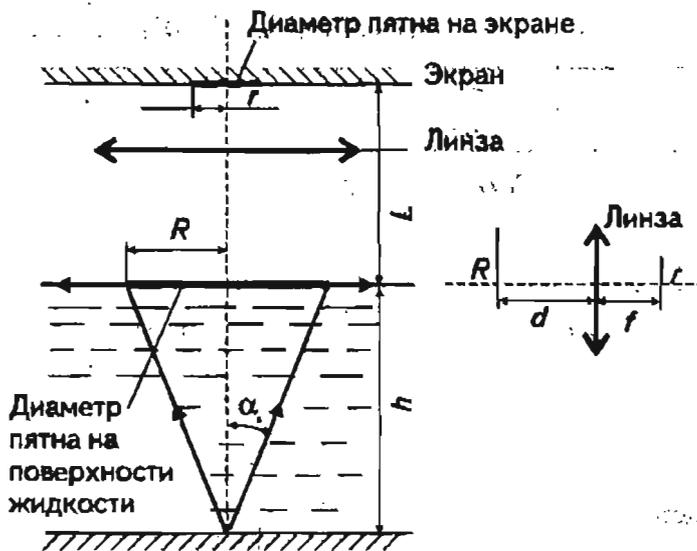


Рис. 14

Решение. Для определения радиуса пятна  $R$  на поверхности жидкости воспользуемся соотношением:

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n}$$

Следовательно:  $\sin \alpha_0 = 0,6 \Rightarrow \alpha_0 = 42^\circ$ ;  $\operatorname{tg} 42^\circ = 0,9$ .

Из треугольника определяем:

$$\frac{R}{h} = \operatorname{tg} \alpha_0 \Rightarrow R = h \cdot \operatorname{tg} \alpha_0; \quad R = 18 \text{ см.}$$

Из формулы уменьшения, даваемого линзой, определяем  $f$ :

$$\Gamma = \frac{r}{R} = \frac{f}{d} \Rightarrow f = \frac{rd}{R} \quad (1)$$

По условию задачи:

$$f + d = L \quad (2)$$

Из соотношений (1) и (2):

$$\frac{rd}{R} + d = L \Rightarrow dR + rd = RL \Rightarrow r = \frac{R(L-d)}{d} \quad (3)$$

Используя формулу тонкой линзы, определим величину  $d$ :

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$$

С учетом (2) получаем:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{L-d} = \frac{1}{F}; F(L-d) + dF = d(L-d)$$

$$FL - Fd + dF = dL - d^2; \Rightarrow d^2 - dL + FL = 0;$$

$$d^2 - 10d + 16 = 0; D = 36;$$

$$d_{1,2} = \frac{10 \pm 6}{2}$$

Значение:  $d_1 = 8$  см удовлетворяет решетию;  
 $d_2 = 2$  см не удовлетворяет решетию.

Согласно (3):

$$r = \frac{18(10-8)}{8} = 4,5 \text{ (см)}$$

Ответ: радиус освещенного пятна на экране  
 $r = 4,5$  см.

### Экспериментальные исследования

#### 1. Наблюдение прямолинейного распространения света

(выполняется дома)

Цель работы: проверка гипотезы о прямолинейности распространения света в воздухе.

Приборы и материалы: лист картона размером 20 x 20 см, карандаш, линейка, несколько булавок с головками.

Ход работы

1. Положите на стол лист картона. С помощью линейки начертите на нем прямую линию.
2. Воткните несколько булавок вдоль этой прямой.
3. Поднимите картон на уровень глаза и посмотрите на булавки вдоль линии (рис. 15).

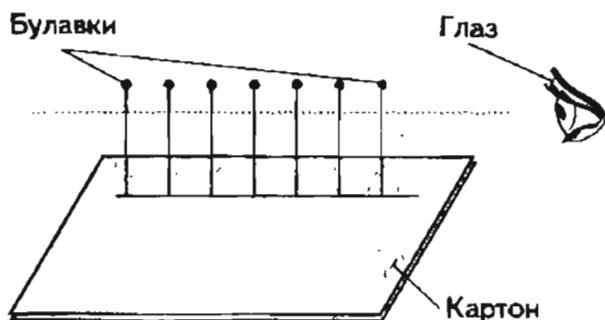


Рис. 15. Схема эксперимента

4. Запишите в тетрадь, сколько булавок вы видите: одну или несколько.
5. Попробуйте какую-либо из булавок воткнуть, немного отступив от прямой. Что вы наблюдаете в этом случае? Запишите результат наблюдения в тетрадь.
6. Какой вывод о распространении света в воздухе вы можете сделать из наблюдений (п.п. 4 и 5)?

#### 2. Наблюдение теней и полутеней

(выполняется в классе)

Цель работы: изучение условий образования теней и полутеней.

Приборы и материалы: две одинаковые парафиновые свечи, экран, линейка, карандаш, спички.

Ход работы

1. Поставьте две одинаковые свечи на расстоянии 50 — 60 см от экрана. Посередине между экраном и свечами вертикально поместите линейку так, как показано на рис. 16. Зажгите свечи. Что получилось на экране? Дополните рис. 16, указав то, что у вас получилось в результате эксперимента. Укажите на рисунке область тени и полутени.

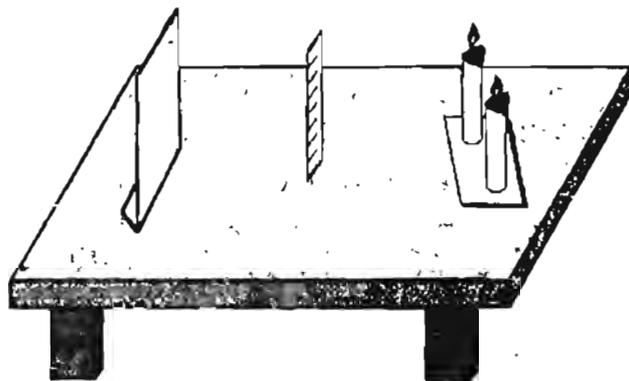


Рис. 16. Схема эксперимента

2. Произвольно перемещайте экран и линейку. Зафиксируйте изменения очертаний теней и полутеней. Запишите результаты наблюдений.
3. Погасите одну свечу. Изменилось ли при этом изображение на экране? Если изменилось, то как?

4. Поместите экран на расстоянии 50 — 60 см от зажженных свечей. Между экраном и свечами поместите карандаш: сначала вертикально, а затем горизонтально. Зарисуйте то, что наблюдается на экране. Какова разница в формах теней и полутеней? Почему?
5. Сделайте вывод об условиях образования тени и полутени. Запишите вывод.

### 3. Особенности зрения человека (выполняется дома)

**Цель работы:** выявить особенности зрения человека.

**Приборы и материалы:** плоское зеркало, линейка, бумажная трубка длиной 20 см.

**Ход работы**

1. Повернитесь лицом к свету и посмотрите в зеркало на свой зрачок.
2. Отвернитесь от света и опять посмотрите на зрачок. Что вы наблюдали? Объясните наблюдаемое явление.
3. Закройте глаз на несколько секунд.
4. Повернитесь лицом к свету и откройте глаза, глядя в зеркало. Что происходит со зрачком? Почему?
5. Держите линейку перед глазами на расстоянии около 30 см. Смотрите мимо линейки на противоположную стену. Хорошо ли видны цифры на линейке?
6. Посмотрите на линейку. Как теперь видны цифры? А хорошо ли видна противоположная стена? Какое свойство глаза вы исследовали в этом опыте?
7. Выберите на противоположной стене какую-либо отметку. Не двигая головой, выполните следующие задания.
  - 1) Найдите отметку правым глазом (левый глаз закрыт). Заметьте, какую часть стены вы видите. Это — поле зрения правого глаза.
  - 2) Определите поле зрения левого глаза. Совпадают ли поля зрения правого и левого глаза?
  - 3) Посмотрите на отметку двумя глазами. Насколько увеличилась видимая область?

8. Сделайте бумажную трубку длиной около 20 см. Посмотрите на выбранную отметку через трубку. Как изменилось поле зрения?
9. Держите в вытянутой руке колпачок от ручки. Закройте один глаз и попробуйте попасть ручкой в колпачок. Легко ли это сделать?
10. Попробуйте выполнить тот же опыт с открытыми глазами. Удалось ли вам проделать его?
11. Сделайте вывод о значении зрения двумя глазами.

### Лабораторные работы

#### 1. Изучение отражения света в плоском зеркале (выполняется в классе)

**Цель работы:** знакомство с особенностями отражения света в плоском зеркале; проверка закона отражения света.

**Приборы и материалы:** плоское зеркало, лист чистой бумаги, экран со щелью, транспортир, карандаш, свеча (или другой источник света), спички.

**Ход работы**

1. Расположите оборудование так, как показано на рис. 17.

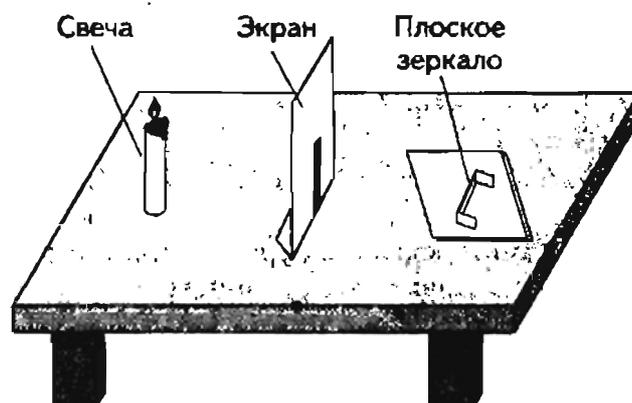


Рис. 17

2. Зажгите свечу. С помощью экрана со щелью выделите узкий пучок света. Направьте пучок на плоское зеркало.
3. С помощью карандаша проведите на листе чистой бумаги линию по направлению падающего и отраженного светового луча, а также вдоль по-

верхности зеркала. В точку падения луча восстановите перпендикуляр к поверхности зеркала. На листе бумаги укажите падающий, отраженный луч, перпендикуляр, плоскость зеркала, углы падения и отражения лучей.

4. С помощью транспортира измерьте углы падения и отражения лучей. Меняя положение плоского зеркала, замерьте новые значения углов падения и отражения. Проведите эксперимент не менее трех раз.

5. Результаты измерений занесите в таблицу.

Номер опыта	Угол падения	Угол отражения	Сравнение углов падения и отражения
1			
2			
3			
4			

6. По результатам эксперимента сделайте вывод и запишите его в тетрадь.

*Самостоятельные работы*

### Работа 1

(выполняется в классе, рассчитана на 20 мин)

1. Из перечисленных ниже тел выберите тело, являющееся естественным источником света.

- А. Телевизор.
- Б. Зеркало.
- В. Луна.
- Г. Солнце.
- Д. Земля.

2. Какое из перечисленных явлений объясняется прямолинейным распространением света?

- А. Молния.
- Б. Блеск драгоценных камней.
- В. Радуга.

Г. Тень от дерева.

Д. Полярное сияние.

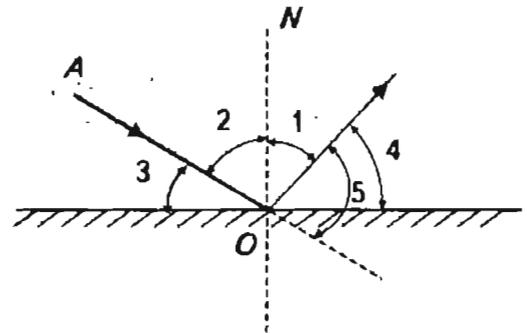


Рис. 18

3. На рис. 18 показано отражение луча от плоского зеркала. Предполагая, что  $OA$  — падающий луч, ответьте на следующие вопросы.

- 1) Какой из углов, отмеченных на рис. 18, является углом падения?
- 2) Какой из углов, отмеченных на рис. 18, является углом отклонения луча от первоначального направления?
- 3) Чему равен угол отклонения луча от первоначального направления, если угол падения равен  $60^\circ$ .
- 4) Как изменится угол отклонения луча от первоначального направления при увеличении угла падения на  $10^\circ$ ?

### Работа 2 (выполняется дома)

1. На рис. 19 показано направление прохождения светового луча  $COD$ .

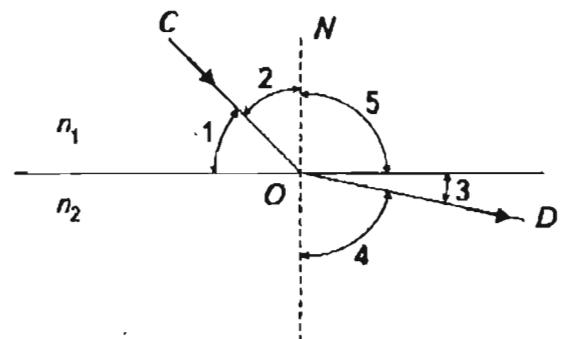


Рис. 19

Ответьте на следующие вопросы.

- 1) Какой из углов, отмеченных на рис. 19, является углом преломления?
- 2) Абсолютный показатель преломления первой среды  $n_1 = 1,5$ . Угол падения равен  $30^\circ$ , угол преломления —  $45^\circ$ . Чему равен абсолютный показатель преломления второй среды  $n_2$ ?
2. Какая из точек, показанных на рис. 20, является изображением точки  $S$  в плоском зеркале?



Рис. 20

- |                                      |                                      |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> А. Точка 1. | <input type="checkbox"/> Б. Точка 2. |
| <input type="checkbox"/> В. Точка 3. | <input type="checkbox"/> Г. Точка 4. |
| <input type="checkbox"/> Д. Точка 5. |                                      |

3. На рис. 21 показано изображение спортсмена, стоящего перед зеркалом. В какой руке (правой или левой) он держит ракетку?

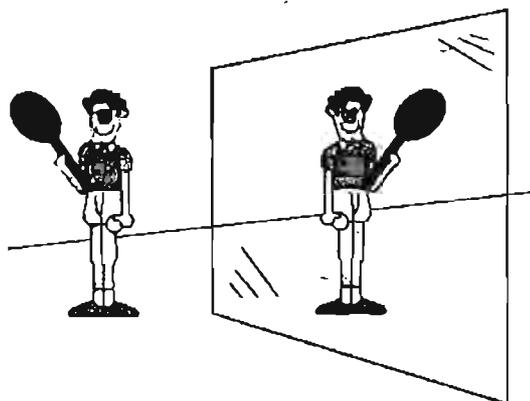


Рис. 21

4. На рис. 22 отметьте цифрой 1 изображение собирающей линзы и цифрой 2 изображение рассеивающей линзы?

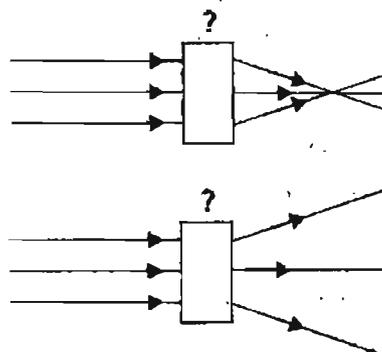


Рис. 22

### Работа 3

(уровень А, выполняется в классе и дома)

1. Рассчитайте, на какой угол отклоняется узкий световой пучок от своего первоначального направления при переходе из стекла в воздух, если угол падения  $30^\circ$ . То же рассчитайте при угле падения  $45^\circ$ . Показатель преломления стекла примите равным 1,5.
2. Предмет расположен на расстоянии 0,15 м от рассеивающей линзы с фокусным расстоянием 0,3 м. На каком расстоянии от линзы получается изображение данного предмета?
3. Светящийся предмет находится на расстоянии 420 см от экрана. Где надо поместить собирающую линзу, чтобы получить на экране 20-кратное увеличение предмета? Какова оптическая сила линзы?
4. Фотоаппарат имеет объектив с главным фокусным расстоянием  $F = 5$  см и фотопленку с размером кадра 6 x 8 см. Требуется снять чертеж размерами 60 x 60 см. На каком расстоянии от чертежа надо поместить объектив фотоаппарата, чтобы снимок получился возможно большим? На каком расстоянии от объектива должна устанавливаться пленка?
5. На рассеивающую линзу с главным фокусным расстоянием  $F_1$  падает пучок параллельных лучей. На каком расстоянии от этой линзы надо поместить собирающую линзу, чтобы лучи из нее вышли параллельным пучком. Главное фокусное расстояние собирающей линзы  $F_2 = 2 F_1$ .

6. Линзы с оптическими силами 4 и 5 дптр находятся на расстоянии 0,9 м друг от друга. Где находится изображение предмета, расположенного на расстоянии 0,5 м перед первой линзой?
7. Вертикальный стержень высотой 5 см находится на расстоянии 60 см от вершины выпуклого зеркала с радиусом кривизны 40 см. Где будет изображение стержня и какое оно? Какова высота изображения?
8. Пациент при проверке зрения четко видит буквы на расстоянии 0,16 м от глаза. Определите недостаток его зрения. Какой оптической силы очки ему требуются?
9. Близорукий человек лучше всего различает мелкий шрифт, расположенный на расстоянии 15 см от глаза. Какие очки для чтения нужны этому человеку?

#### Работа 4

(уровень Б; выполняется в классе и дома)

1. На дне сосуда, наполненного водой до высоты  $h$ , находится точечный источник света. На поверхности воды плавает круглый диск так, что его центр находится над источником света. При каком минимальном радиусе диска лучи от источника не будут выходить из воды?
2. Выпуклая сторона плосковыпуклой линзы с радиусом кривизны  $R$  и показателем преломления  $n$  посеребрена, в результате чего получилось своеобразное вогнутое зеркало. Чему равно фокусное расстояние такого зеркала?
3. В вогнутое зеркало радиусом 50 см наливают воду. Оптическая сила полученной системы равна 5,3 дптр. Чему равно фокусное расстояние водяной линзы?
4. Тонкая линза (фокусное расстояние  $F = 0,63$  м) подвешена на нити к потолку и равномерно движется по окружности (рис. 23), причем оптическая ось линзы все время остается вертикальной. При какой угловой скорости вращения изображение точки подвеса будет находиться на полу? Высота комнаты  $H = 3$  м.
5. Параллельный пучок лучей падает на прямоугольную призму по нормали к передней грани (рис. 24). Диаметр пучка до призмы 3 см. На эк-

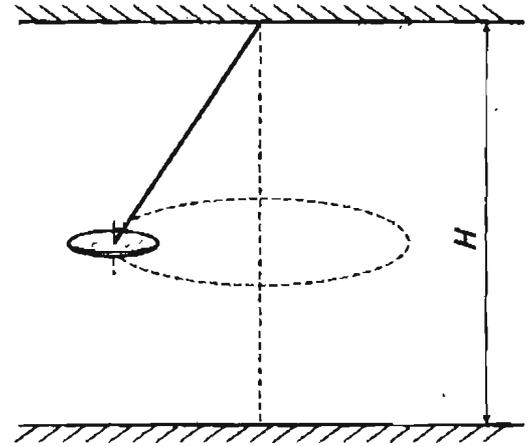


Рис. 23

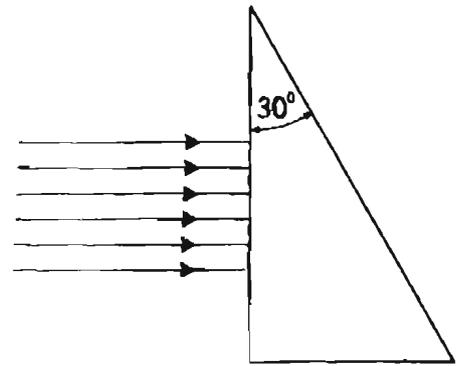


Рис. 24

ране, поставленном за призмой перпендикулярно пучку, диаметр пятна 2,5 см. Рассчитайте показатель преломления материала призмы. Окружающая среда - воздух.

6. Шарик массой  $m = 50$  г движется со скоростью  $v_0 = 5 \frac{m}{c}$  вдоль оптической оси собирающей линзы, установленной на подставке на гладкой поверхности (рис. 25). Масса линзы с подставкой  $M = 0,2$  кг, фокусное расстояние линзы  $F = 10$  см. После упругого удара шарик отскакивает от линзы. Определите промежуток времени, в

течение которого будет существовать мнимое изображение шарика. Силу тяжести, действующую на шарик, считать пренебрежимо малой.

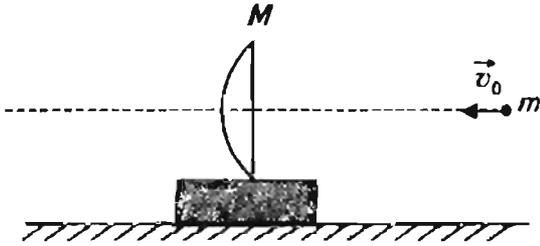


Рис. 25

Контрольные работы

Работа 1 (уровень А, рассчитана на 35 минут)  
Вариант 1

- Из перечисленных тел выберите тело, являющееся естественным источником света.
 

<input type="checkbox"/> А. Телевизор.	<input type="checkbox"/> Б. Зеркало.
<input type="checkbox"/> В. Луна.	<input type="checkbox"/> Г. Солнце.
- Угол падения светового луча равен  $30^\circ$ . Угол отражения светового луча равен...
 

<input type="checkbox"/> А. $0^\circ$ .	<input type="checkbox"/> Б. $30^\circ$ .
<input type="checkbox"/> В. $60^\circ$ .	<input type="checkbox"/> Г. $90^\circ$ .
- При солнечном затмении на Земле образуется тень и полутень от Луны (рис. 26). Что видит человек, находящийся в точке А?
 

<input type="checkbox"/> А. Человек видит светящийся диск Солнца целиком.
<input type="checkbox"/> Б. Человек не видит светящегося диска Солнца совсем.
<input type="checkbox"/> В. Человек видит только верхнюю часть светящегося диска Солнца (К).
<input type="checkbox"/> Г. Человек видит края светящегося диска Солнца (К и М).
- Какая из точек, показанных на рис. 27, является изображением точки S в плоском зеркале?
 

<input type="checkbox"/> А. Точка 1.	<input type="checkbox"/> Б. Точки 2 и 5.
<input type="checkbox"/> В. Точка 3.	<input type="checkbox"/> Г. Точка 4.

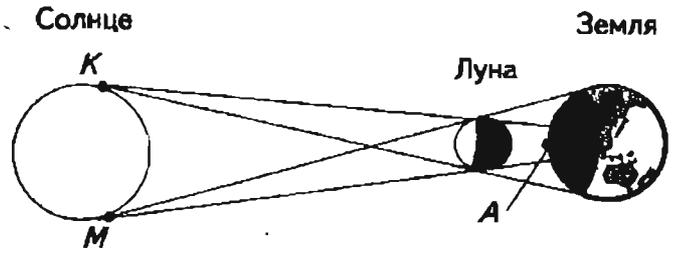


Рис. 26

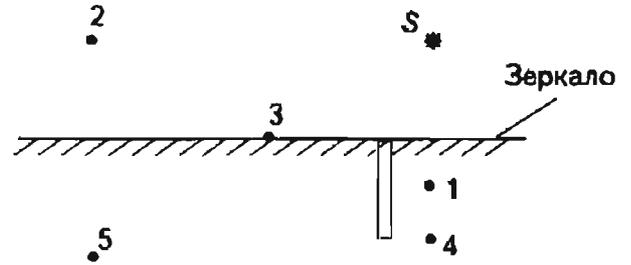


Рис. 27

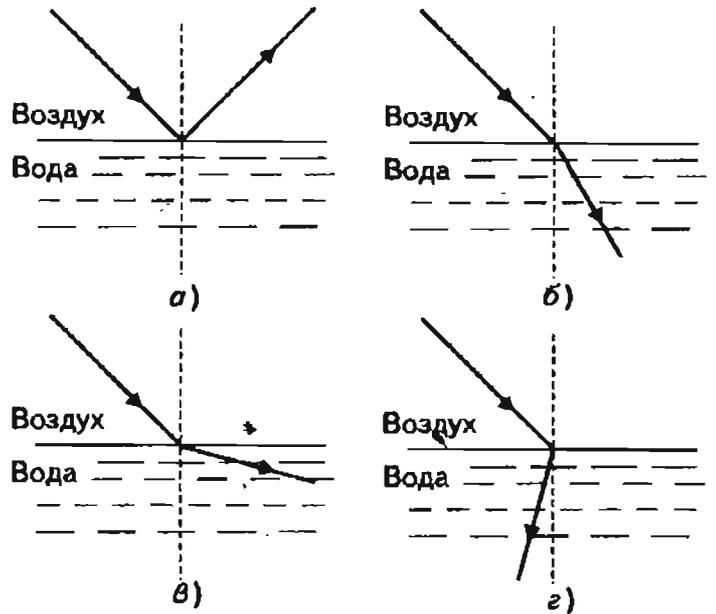


Рис. 28

- На каком из рисунков (рис. 28) правильно показано преломление света?
 

<input type="checkbox"/> А. На рис. а).	<input type="checkbox"/> Б. На рис. б).
<input type="checkbox"/> В. На рис. в).	<input type="checkbox"/> Г. На рис. г).

6. На экране (рис. 29) необходимо получить увеличенное изображение свечи. С помощью какого прибора это можно сделать?

- А. Бинокля.       Б. Микроскопа.  
 В. Перископа.     Г. Собирающей линзы.

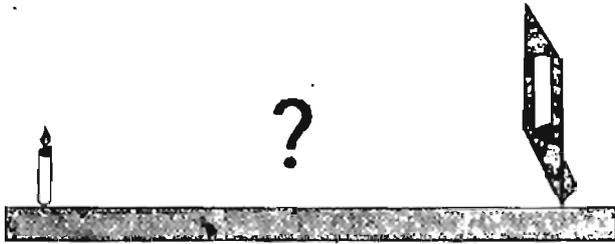


Рис. 29

7. На сетчатке глаза изображение...

- А. увеличенное, прямое, действительное.  
 Б. уменьшенное, перевернутое (обратное), действительное.  
 В. уменьшенное, прямое, мнимое.  
 Г. увеличенное, перевернутое (обратное), мнимое.

8. На каком из рисунков (рис. 30) правильно показана коррекция близорукости?

- А. На рис. а).       Б. На рис. б).  
 В. На рис. в).       Г. На рис. г).

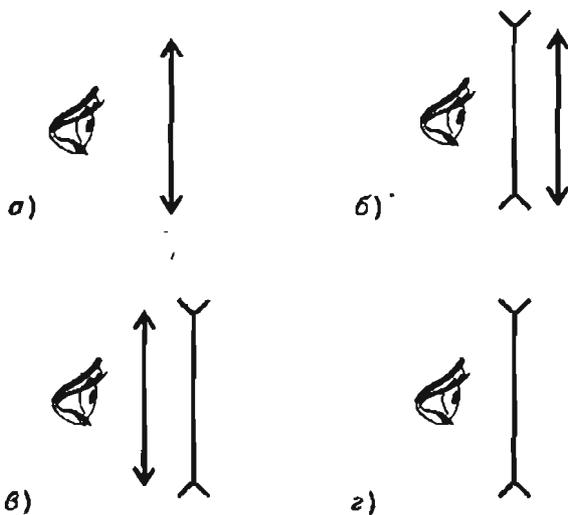


Рис. 30

9. Оптическая система глаза приспособляется к рассматриванию предметов, находящихся на разном расстоянии за счет...

- А. изменения кривизны хрусталика.  
 Б. дополнительного освещения.  
 В. приближения и удаления предметов.  
 Г. световых раздражений.

10. Линзу, изготовленную из двух тонких сферических стекол одинакового радиуса, между которыми находится воздух (воздушная линза), опустили в воду (рис. 31). Как «действует» эта линза?

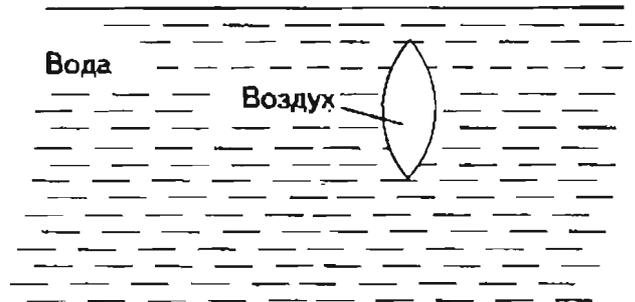


Рис. 31

- А. Как собирающая линза.  
 Б. Как рассеивающая линза.  
 В. Она не изменяет хода лучей.  
 Г. Может «действовать» и как собирающая, и как рассеивающая линза.

### Работа 1 (уровень А, рассчитана на 35 минут) Вариант 2

1. Какое из перечисленных явлений объясняется прямолинейным распространением света?

- А. Молния.  
 Б. Блеск драгоценных камней.  
 В. Радуга.  
 Г. Тень от дерева.

2. На рисунках (рис. 32) изображен ход падающего и отраженного лучей. На каком из них верно построен отраженный луч?

- А. На рис. а).       Б. На рис. б).  
 В. На рис. в).       Г. На рис. г).

3. При солнечном затмении на Земле образуется тень и полутень от Луны (рис. 33). Что видит человек, находящийся в точке В?

- А. Человек видит светящийся диск Солнца целиком.

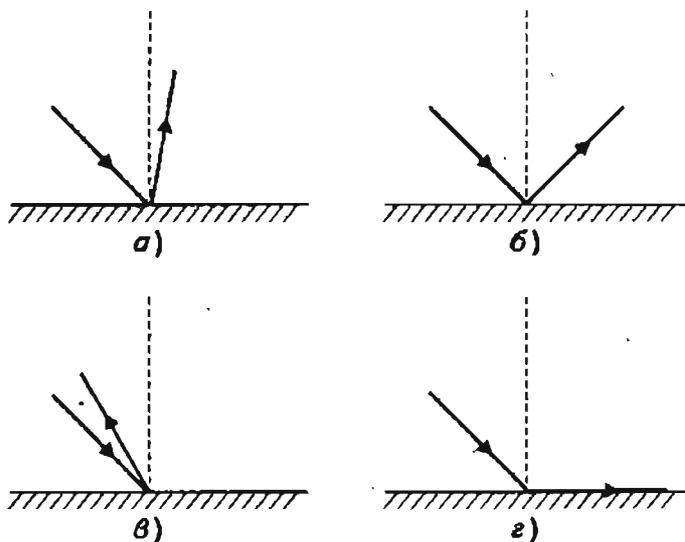


Рис. 32

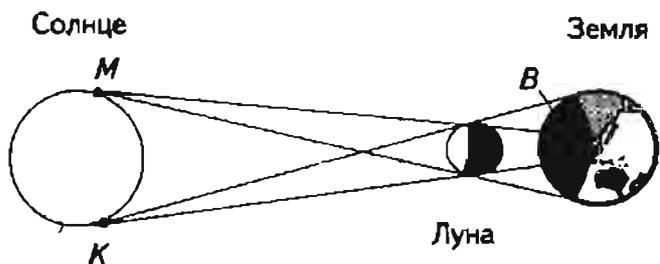


Рис. 33

- Б. Человек совсем не видит светящегося диска Солнца.
- В. Человек видит только верхнюю часть светящегося диска Солнца (M).
- Г. Человек видит края светящегося диска Солнца (M и K).

4. На рис. 34 показан предмет (стрелка) MN и плоское зеркало. Какое из изображений предмета является верным?

- А. Изображение 1.     Б. Изображение 2.
- В. Изображение 3.     Г. Изображение 4.

5. На каком из рисунков (рис. 35) показано отражение света от плоского зеркала?

- А. На рис. а).     Б. На рис. б).
- В. На рис. в).     Г. На рис. г).

6. На светочувствительной пленке фотоаппарата получается изображение...

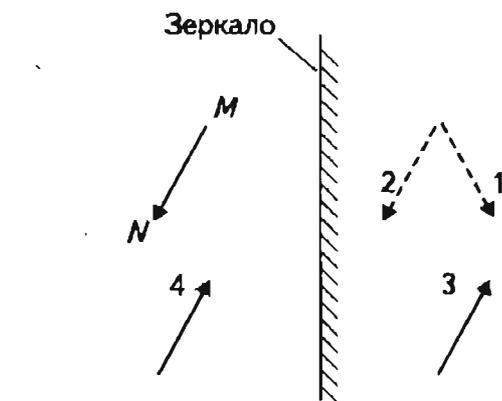


Рис. 34

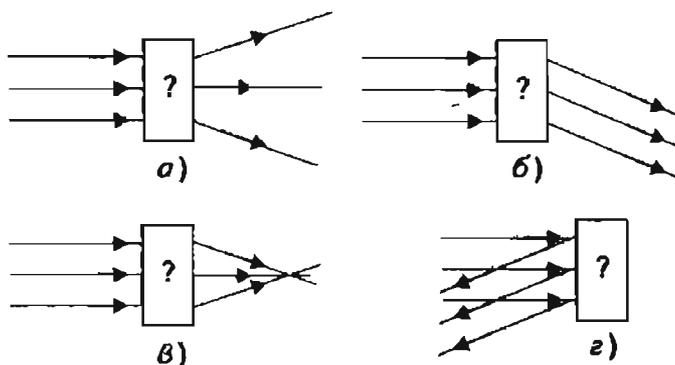


Рис. 35

- А. уменьшенное, перевернутое (обратное), мнимое.
- Б. уменьшенное, перевернутое (обратное), действительное.
- В. увеличенное, прямое, действительное.
- Г. увеличенное, перевернутое (обратное), мнимое.

7. Какой оптический прибор может давать увеличенное и действительное изображение предмета?

- А. Плоское зеркало.
- Б. Стекла́нная пластинка.
- В. Собирающая линза.
- Г. Рассеивающая линза.

8. На каком из рисунков (рис. 36) правильно показана коррекция дальности зрения?

- А. На рис. а).     Б. На рис. б).
- В. На рис. в).     Г. На рис. г).

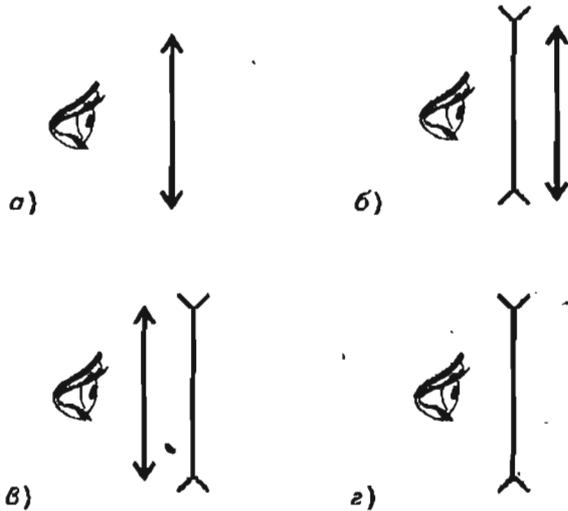


Рис. 36

9. Во время работы свет должен падать...

- А. справа.       Б. слева.  
 В. сверху.       Г. спереди.

10. Определите оптическую силу системы линз, изображенных на рис. 37.



$F_1 = -0,25 \text{ м}$        $D_2 = 4 \text{ дптр}$

Рис. 37

- А. 0.       Б. 2 дптр.  
 В. 4 дптр.       Г. 8 дптр.

**Работа 2 (уровень А, рассчитана на 30 минут)**  
**Вариант 1**

1. Постройте изображение стрелки  $AB$  в тонкой линзе (рис. 38)

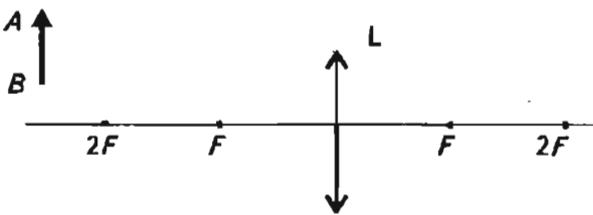


Рис. 38

- Свет падает на стеклянную пластинку под углом  $30^\circ$ . Показатель преломления света в стекле равен 1,4. Чему равен угол преломления в стекле? Решение сопроводите рисунком.
- Почему собирающие линзы очков помогают людям при дальнозоркости?

**Работа 2 (уровень А, рассчитана на 30 минут)**  
**Вариант 2**

- Предмет отстоит от тонкой линзы на расстоянии 4 м. Фокусное расстояние линзы 1,33 м. Найти расстояние от линзы до изображения.
- Постройте изображение стрелки  $AB$  в тонкой линзе (рис. 39).

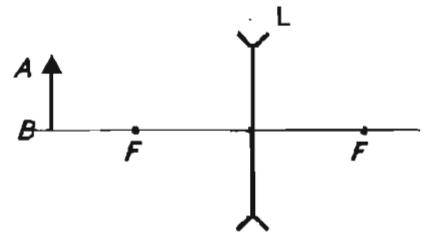


Рис. 39

- Докажите, что в результате прохождения сквозь плоскопараллельную пластинку (например сквозь оконное стекло) луч света не изменяет свое направление.

**Работа 3 (уровень Б, рассчитана на 40 минут)**

- Постройте изображение стрелки  $AB$  в плоском зеркале (рис. 40).

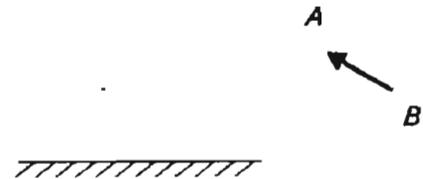
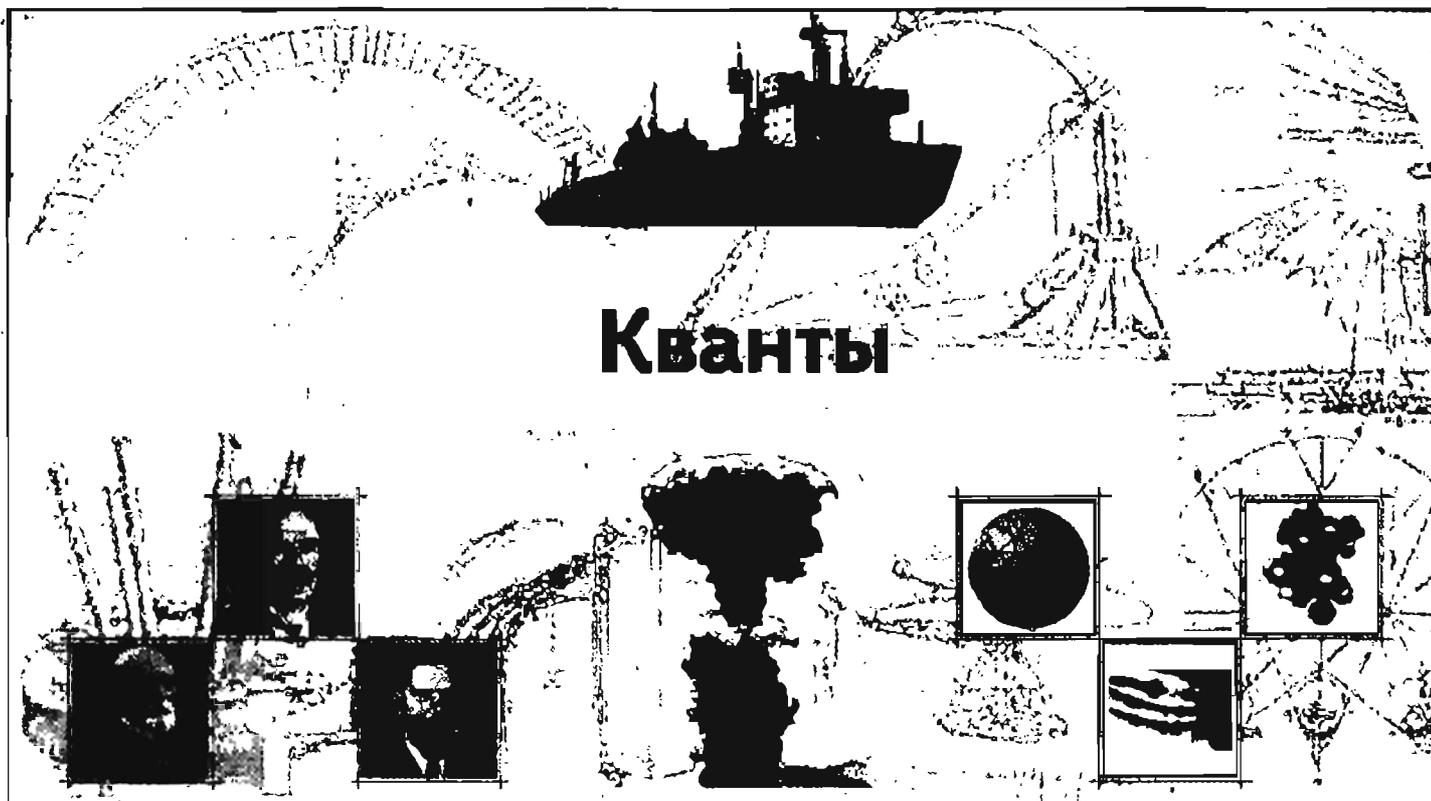


Рис. 40

- Фокусное расстояние объектива фотоаппарата 5 см, размер кадра 24 x 36 мм. Уместится ли в кадре изображение предмета размером 3 x 5 м, расположенного в 6 м от объектива?
- На экран с круглым отверстием радиуса 10 см падает сходящийся пучок света. Угол между крайним лучом и осью симметрии равен  $30^\circ$ . Определите точку, в которой будут сходиться лучи, если в отверстие вставляется собирающая линза с оптической силой  $D = 10 \text{ дптр}$ .

# *Физика атома и атомного ядра*

- ◆ Кванты
- ◆ Радиоактивность
- ◆ Строение атома
- ◆ Атомное ядро
- ◆ Ядерные реакции
- ◆ Ядерная энергия и экология



### Изучив эту тему,

- ♦ вы узнаете, что такое кванты и фотоны;
- ♦ поймете, как фотоны света могут освобождать электроны из атомов;
- ♦ научитесь выполнять опыты, в которых можно обнаружить явление фотоэффекта

### Основные понятия:

Электрон ♦ Квант ♦ Постоянная Планка ♦ Фотон ♦ Фотоэффект ♦ Закон Стефана—Больцмана ♦ Квантовая физика ♦ Работа выхода ♦ Красная граница фотоэффекта ♦ Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта ♦ Импульс фотона ♦ Масса фотона ♦ Эффект Комптона ♦ Фотоэлемент

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

## Электроны, кванты и фотоны (уровень А)

До конца XIX века атомы считались неизменными и неделимыми частицами вещества. Изучение явлений электролиза, электрического разряда в газах, термоэлектронной эмиссии и фотоэффекта показало, что в атомах любого химического элемента имеются одинаковые отрицательно заряженные частицы с массой примерно в 2000 раз меньше массы самого легкого атома — атома водорода. Эти частицы назвали электронами. Электрический заряд

электрона называют элементарным электрическим зарядом. Элементарный электрический заряд  $e$  равен:

$$e \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Опыты показали, что элементарный электрический заряд не делится на части ни в каких процессах.

Открытие электронов в составе любых атомов опровергло представление об атомах как простейших неделимых частицах.

После открытия электрона следующим шагом в создании новой физической картины мира было выдвижение Максом Планком в 1900 году гипотезы о существовании квантов. Согласно этой гипотезе

тезе электромагнитное излучение испускается и поглощается определенными порциями, квантами. Энергия  $E$  каждого кванта пропорциональна частоте  $\nu$  излучения:

$$E = h\nu \quad (1.1)$$

Коэффициент пропорциональности  $h$  между энергией и частотой кванта называется **постоянной Планка**. Постоянная Планка равна:

$$h = 6,6260755 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с.}$$

На основе гипотезы Планка получили теоретическое объяснение экспериментально установленные законы излучения нагретых тел. С гипотезы о существовании квантов электромагнитного излучения началось развитие квантовой физики.

Альберт Эйнштейн в 1905 году дополнил гипотезу Планка о квантовом характере испускания и поглощения телами электромагнитного излучения гипотезой о существовании фотонов как частиц электромагнитного излучения. На основе этой гипотезы Эйнштейн объяснил экспериментально установленные законы фотоэффекта.

**Фотоэлектрическим эффектом** или **фотоэффектом** называется явление освобождения электронов с поверхности тела под действием света.

Фотон с частотой  $\nu$  обладает энергией:

$$E = h\nu.$$

Каждый фотон передает всю свою энергию только одному электрону. Если энергия фотона  $h\nu$  больше работы выхода  $A$  электрона, то электрон может быть вырван с поверхности тела и стать свободным (рис 1).

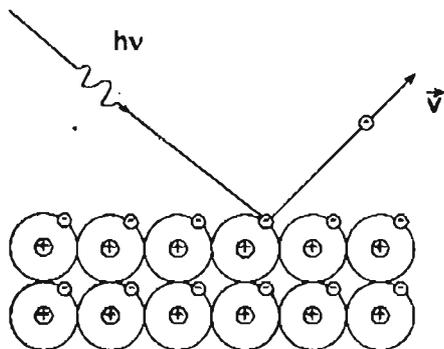


Рис. 1

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона  $E_k$  равна разности энергии фотона  $h\nu$  и работы выхода  $A$ :

$$E_k = h\nu - A \quad (1.2)$$

В атомной физике часто употребляется внесистемная единица энергии **электронвольт (эВ)**. Энергия в один электронвольт (1 эВ) равна работе сил электрического поля, совершаемой при перемещении электрона между точками с разностью потенциалов в один вольт.

## Кванты (уровень Б)

Открытие электронов в составе всех атомов позволило дать качественное объяснение факта излучения света нагретыми телами. Световые волны, как и любые другие виды электромагнитного излучения, должны возникать при ускоренном движении электрических зарядов. При высокой температуре атомы вещества движутся с большими скоростями. Можно предположить, что при столкновениях атомов возбуждаются колебания электронов относительно положительного заряда, имеющегося в атоме, и в результате таких колебаний возникают световые волны.

От качественной гипотезы необходимо было перейти к созданию теории излучения нагретых тел, которая объяснила бы все известные экспериментальные факты.

Об излучении нагретых тел к концу XIX века было известно довольно много. Было экспериментально установлено, что мощность  $E$  излучения нагретых тел прямо пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры  $T$  тела:

$$E = \sigma \cdot T^4 \quad (1.3)$$

Эту зависимость энергии излучения от температуры называют **законом Стефана–Больцмана**. Было экспериментально исследовано электромагнитное излучение, находящееся в равновесии с излучающим телом (когда нагретое тело излучает в единицу времени столько же энергии, сколько получает в результате поглощения). Полученную в эксперименте кривую распределения энергии излучения нагретого тела, представленную кривой 1 на рис. 2 не удалось объяснить теоретически. Из классической теории с непрерывным излучением электромагнитных волн получалась кривая 2 на том же рисунке, резко расходящаяся с экспериментальной кривой.

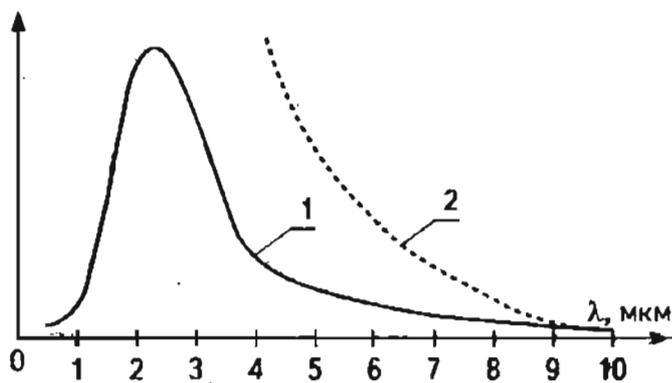


Рис. 2

Решительный шаг на пути создания новой физической картины мира сделал в 1900 году немецкий физик Макс Планк. Он высказал гипотезу о существовании квантов. Квантами он назвал определенные порции электромагнитного излучения. Основным смыслом гипотезы Планка заключался в том, что *электромагнитное излучение излучается и поглощается не непрерывно, а определенными порциями, квантами*. Энергия каждого кванта пропорциональна частоте  $\nu$  излучения:

$$E = h\nu.$$

Коэффициент пропорциональности  $h$  в этой формуле называется теперь постоянной Планка.

До квантовой гипотезы считалось очевидным, что электромагнитные волны непрерывно излучаются нагретыми телами. Действительно, если в качестве источника электромагнитного излучения рассматривать все нагретое тело, то температура тела постоянна, все физические условия неизменны, неизменным должен быть и процесс излучения.

Совсем иная картина возникает, если в качестве источников электромагнитных волн рассматривать отдельные атомы. К одному атому не применимо понятие температуры, атом может обладать большей или меньшей энергией. Обладая избытком энергии, атом возможно каким-то образом излучает ее в виде электромагнитных волн. Но в таком случае процесс излучения должен быть ограничен во времени и после израсходования атомом избытка энергии должен прекратиться.

Именно такому способу рассмотрения взаимодействия электромагнитного излучения с веществом открывала возможность гипотеза Планка о существовании квантов.

Планк не только высказал гипотезу о существовании квантов, но и вывел формулу для вычисления распределения энергии в спектре равновесного теплового излучения тел. Эта формула оказалась в полном согласии с результатами эксперимента. Таким образом с гипотезы Планка началось развитие квантовой физики.

Лабораторная  
работа

### Исследование зависимости мощности теплового излучения тела от его температуры (уровень В)

**Цель работы.** Приобретение опыта экспериментального установления закона зависимости одного физического параметра от другого в определенном физическом процессе.

**Оборудование.** Лампа накаливания на 6,3 В; 5 сухих гальванических элементов 1,5 В или регулируемый источник постоянного тока; соединительные провода; цифровой мультиметр; вольтметр 10 В.

**Задачи.** Исследуйте, как зависит мощность излучения нагретого тела от его температуры. В качестве нагретого тела используйте вольфрамовую спираль лампы накаливания. Для определения температуры нити лампы воспользуйтесь известным значением температурного коэффициента электрического сопротивления вольфрама:

$$\alpha = 5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}.$$

**Содержание работы.** Современная квантовая физика ведет начало от выдвижения идеи о существовании квантов. Гипотезу о существовании квантов Планк предложил для теоретического объяснения экспериментально наблюдаемых закономерностей равновесного электромагнитного излучения нагретых тел. В настоящей работе предлагается экспериментально обнаружить одну из закономерностей теплового излучения тел, для объяснения которых потребовалось создание квантовой физики.

Закон, который Вам предстоит заново открыть, был экспериментально установлен в 1879 году И. Стефаном и теоретически выведен в 1884 году Л. Больцманом и поэтому называется законом Стефана–Больцмана. Он устанавливает связь между абсолютной температурой тела и мощностью его теплового электромагнитного излучения.

Для установления связи между мощностью электромагнитного излучения тела и его температурой нужно измерить мощность излучения при различных значениях температуры тела. Температуру нити электрической лампы накаливания можно изменять, изменяя подаваемое напряжение. Температуру  $t$  нити можно вычислить, определив электрическое сопротивление  $R_t$  нити при температуре  $t$  и электрическое сопротивление  $R_0$  нити при  $0^\circ\text{C}$ :

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (1.4)$$

$$t = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{R_t}{R_0} - 1 \right) \quad (1.5)$$

Температура  $T$  нити по абсолютной шкале равна:

$$T = t + 273 \text{ (K)} \quad (1.6)$$

Электрическое сопротивление  $R_0$  нити при  $0^\circ\text{C}$  можно определить, измеряя ее сопротивление при охлаждении лампы до  $0^\circ\text{C}$ , или измерив сопротивление  $R_t$  при комнатной температуре и вычислив  $R_0$  по формуле (1.4).

Главная трудность в этом эксперименте связана с определением значения сопротивления нити лампы при  $0^\circ\text{C}$ . Для измерения сопротивления нити лампы мы пропускаем через нее электрический ток. Прохождение тока сопровождается нагреванием нити и ее температура изменяется. Чтобы свести ошибку, вносимую эффектом нагревания нити током, к минимуму, нужно уменьшить значение пропускаемого через нее тока до минимума. Для этой цели лучше всего подходит омметр цифрового мультиметра.

Электрическое сопротивление нити в нагретом состоянии можно определить, измерив силу тока  $I$  и напряжение  $U$  на лампе:

$$R_t = \frac{U}{I} \quad (1.7)$$

Мощность  $P$  теплового электромагнитного излучения нити лампы при высокой температуре нити

можно считать приблизительно равной мощности электрического тока, выделяющейся на лампе:

$$P = I \cdot U \quad (1.8)$$

Порядок выполнения работы.

1. Используя омметр цифрового мультиметра, измерьте электрическое сопротивление  $R_1$  нити лампы при комнатной температуре. При измерении учтите влияние соединительных проводов на результаты измерения. Для этого после измерения электрического сопротивления нити лампы соедините концы проводов, соединяющих омметр с выводами лампы, и снимите показания омметра. Для нахождения сопротивления  $R_1$  нужно вычесть из полученного в первом измерении значения общего сопротивления  $R_{\text{об}}$  проводов и нити лампы значение сопротивления проводов  $R_{\text{пр}}$ , полученное во втором измерении

$$R_1 = R_{\text{об}} - R_{\text{пр}} \quad (1.9)$$

2. Используя формулу (1.4), вычислите электрическое сопротивление  $R_0$  нити лампы

$$R_0 = \frac{R_1}{1 + \alpha t} \quad (1.10),$$

где  $t$  – температура воздуха в комнате,

$$\alpha = 5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}.$$

3. Соберите электрическую цепь из лампы, источника постоянного тока, вольтметра и амперметра по схеме на рисунке 3. Подайте на лампу напряжение с двух последовательно соединенных гальванических элементов или 3 вольта с выхода источника постоянного тока.

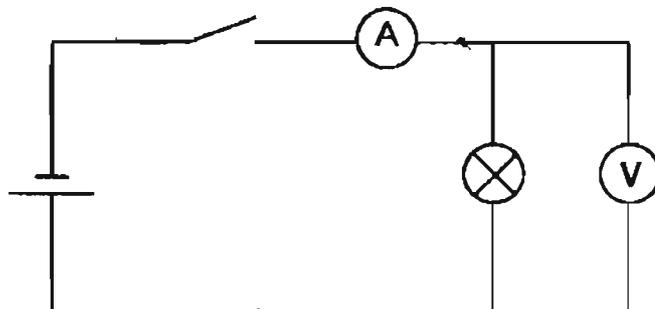


Рис. 3

Измерьте силу тока  $I$  в цепи и напряжение  $U$  на лампе. Результаты измерений запишите в отчетную таблицу 1.

- Повторите измерения, используя 3, 4 и 5 последовательно соединенных гальванических элементов или увеличивая подаваемое с выхода выпрямителя напряжение до 4,5 В, 5,5 В и 6,5 В. Результаты измерений запишите в отчетную таблицу 1.
- По измеренным значениям напряжения  $U$  и силы тока  $I$  вычислите мощность  $P$  излучения и электрическое сопротивление  $R_l$  нити лампы. Результаты занесите в отчетную таблицу 1.
- Используя результаты измерений электрического сопротивления нити лампы  $R_l$  и  $R_0$ , вычислите по формулам (1.4) и (1.5) температуру  $T$  нити в каждом опыте. Результаты вычислений занесите в отчетную таблицу 1.

Отчетная таблица 1

$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$P, \text{Вт}$	$R_l, \text{Ом}$	$T, \text{К}$

- Из отчетной таблицы 1 видно, что мощность  $P$  теплового излучения возрастает с увеличением абсолютной температуры нити. Для нахождения закона, устанавливающего связь мощности  $P$  с температурой  $T$ , предположим, что искомая связь выражается формулой вида

$$P = \alpha \cdot T^n \quad (1.11)$$

где  $n$  – какое-то постоянное целое число.

Если для какого-то значения  $n$  это предположение справедливо, то при всех экспериментально полученных значениях температуры  $T$  отношение

$\frac{P}{T^n}$  будет постоянным. Для проверки

этого предположения вычислите значения  $T^2, T^3, T^4$  и  $T^5$  для всех полученных в опытах значений

температуры  $T$  и найдите отношения  $\frac{P}{T}, \frac{P}{T^2},$

$\frac{P}{T^3}, \frac{P}{T^4}, \frac{P}{T^5}$ . Результаты вычислений запишите в отчетную таблицу 2.

Отчетная таблица 2

$T, \text{К}$					
$\frac{P}{T}, \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$					
$T^2, \text{К}^2$					
$\frac{P}{T^2}, \frac{\text{Вт}}{\text{К}^2}$					
$T^3, \text{К}^3$					
$\frac{P}{T^3}, \frac{\text{Вт}}{\text{К}^3}$					
$T^4, \text{К}^4$					
$\frac{P}{T^4}, \frac{\text{Вт}}{\text{К}^4}$					
$T^5, \text{К}^5$					
$\frac{P}{T^5}, \frac{\text{Вт}}{\text{К}^5}$					

- Постройте графики зависимости отношений  $\frac{P}{T^n}$  от  $T$  для разных значений  $n$ . Если для одного из значений  $n$  график будет горизонтальной прямой, то предположение о связи мощности излучения  $P$  с температурой  $T$  по закону (1.11) для данного  $n$  окажется экспериментально подтвержденным.

### Контрольные вопросы

- Каким образом в данном исследовании вы определяли температуру нити лампы?
- Каким образом вы определяли мощность теплового излучения нити лампы?
- С какой целью в работе предлагалось построить графики зависимости отношения  $\frac{P}{T^n}$  от  $T$  при разных значениях  $n$ ?

4. Близки ли полученные вами результаты эксперимента к результатам исследований Стефана и Больцмана?

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы.*

## ФОТОНЫ (уровень Б)

Освобождение электронов с поверхности тел под действием света называется **фотоэлектрическим эффектом** или **фотоэффектом**.

Законы фотоэффекта с использованием современных знаний о природе фотоэлектрического тока можно сформулировать следующим образом.

1. Число фотоэлектронов, освобождаемых за единицу времени из катода, прямо пропорционально мощности светового излучения;
2. Максимальная кинетическая энергия  $E_k$  фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света  $\nu$  и не зависит от мощности светового излучения (рис. 4).

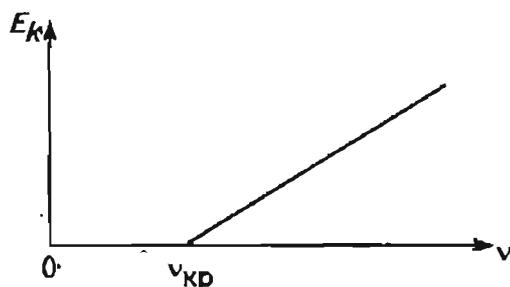


Рис. 4

3. Если частота света меньше некоторой определенной для данного вещества минимальной частоты  $\nu_{кр}$ , то фотоэффект не происходит. (Этот эффект называется красной границей фотоэффекта).

Кроме трех законов фотоэффекта необходимо отметить одну замечательную особенность фотоэлектрических явлений: фотоэлектроны освобождаются с поверхности тела в тот самый момент, когда на тело падает свет, без какого-бы то ни было запаздывания по времени.

Попытки объяснения явления фотоэлектрического эффекта на основе представлений о свете как электромагнитной волне встретились с непреодолимыми затруднениями.

Электромагнитная волна при достижении поверхности тела должна вызывать вынужденные колебания всех электронов, находящихся в поверхностном слое вещества. Электроны могли бы получить достаточную энергию, постепенно забирая ее от приходящих волн и увеличивая амплитуду вынужденных колебаний. Но в таком случае выход фотоэлектронов должен происходить спустя некоторое время после начала освещения. Однако никакого запаздывания выхода фотоэлектронов на опыте не наблюдалось.

Электромагнитная теория света не могла объяснить и независимость энергии фотоэлектронов от мощности излучения, пропорциональность энергии фотоэлектронов частоте света, существование красной границы фотоэффекта.

Полное объяснение всех закономерностей фотоэлектрического эффекта дал в 1905 году Альберт Эйнштейн на основе гипотезы о существовании квантов света как особого вида частиц — фотонов.

При фотоэлектрическом эффекте фотон, встретившись с электроном, передает ему всю свою энергию, а сам исчезает. Электрон, получивший дополнительную энергию от фотона, может покинуть поверхность тела в том случае, если поглощенная энергия  $h\nu$  превышает работу выхода  $A$ :

$$h\nu > A.$$

Работой выхода  $A$  при освобождении электрона с поверхности тела называется работа, которую необходимо совершить против действия сил притяжения со стороны положительных зарядов, имеющих внутри атомов.

Граничное значение частоты  $\nu_{кр}$  света, при которой еще возможен фотоэлектрический эффект, определяется условием:

$$h\nu_{кр} = A \quad (1.12)$$

$$\nu_{кр} = \frac{A}{h} \quad (1.13)$$

Частота  $\nu_{кр}$  определяет красную границу фотоэффекта.

Максимальное значение кинетической энергии, какой может обладать фотоэлектрон, равно разности значения энергии фотона  $h\nu$  и работы выхода  $A$ :

$$E_k = h\nu - A \quad (1.14)$$

Уравнение (1.14) называется уравнением Эйнштейна для фотоэффекта. Из уравнения (1.14) следует

линейная зависимость максимальной кинетической энергии  $E_k$  фотоэлектронов от частоты света  $\nu$ .

Кинетическую энергию электронов, атомов и фотонов часто выражают во внесистемных единицах — электронвольтах. Энергия в один электронвольт (1 эВ) равна работе сил электрического поля, совершаемой при перемещении электрона между точками с разностью потенциалов в один вольт. При известном значении заряда электрона  $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл можно установить связь единицы энергии 1 эВ с единицей энергии в СИ 1 Дж:

$$1 \text{ эВ} = eU = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

При объяснении фотоэффекта на основе представлений о существовании фотонов никакого запаздывания выхода фотоэлектронов после начала освещения быть не должно, так как каждый фотон в момент поглощения передает одному электрону энергию, достаточную для его освобождения.

С открытием существования фотонов в физической картине мира произошло существенное изменение — вместо непрерывных в пространстве электромагнитных световых волн появились частицы — фотоны. В мире, кроме атомов, уже насчитывалось два вида частиц — электроны и фотоны.

Фотоны, как и другие частицы, характеризуются не только энергией, но так же импульсом  $p$  и массой  $m$ .

Импульс фотона  $p$ , как и любого другого тела, определяется релятивистской формулой:

$$p = \frac{v \cdot E}{c^2} \quad (1.15),$$

где:  $E$  — полная энергия;

$c$  — скорость света;

$v$  — скорость тела.

Для фотона  $E = h\nu$  и  $v = c$ , поэтому его импульс равен:

$$p = \frac{h\nu}{c} \quad (1.16).$$

Из релятивистской формулы связи полной энергии  $E$ , импульса  $P$  и массы  $m$  тела:

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4 \quad (1.17)$$

и формулы (1.15) релятивистского импульса следует, что масса любой частицы, движущейся со ско-

ростью света  $v = c$ , равна нулю. Масса  $m$  фотона равна нулю.

Замечательным подтверждением гипотезы Эйнштейна о фотоне как частице с определенными энергией и импульсом, способной взаимодействовать с другой частицей в определенной точке пространства, был эффект, открытый американским физиком Артуром Комптоном в 1922 году. Комптон обнаружил, что при прохождении рентгеновского излучения с определенной длиной волны  $\lambda$  через вещество возникает рассеянное электромагнитное излучение с измененной длиной волны, причем изменение длины волны  $\Delta\lambda$  зависит от угла  $\varphi$  рассеяния. Этот эффект, названный **эффектом Комптона**, получает полное количественное объяснение, если рассматривать процесс рассеяния рентгеновского излучения в веществе как процесс рассеяния рентгеновских фотонов на электронах. Фотон при столкновении с электроном передает ему часть своей энергии и импульса, в результате энергия (и частота) фотона и направление его движения изменяются (рис. 5).



Рис. 5

Явление фотоэлектрического эффекта используется во многих электронных приборах для преобразования энергии светового излучения в энергию электрического тока. Простейший прибор для преобразования света в электрический ток называется вакуумным **фотоэлементом**. Вакуумный фотоэлемент состоит из стеклянной колбы, половина внутренней поверхности которой покрыта тонким слоем вещества с малой работой выхода электронов. Эта пленка служит катодом. Напротив катода располагается небольшой анод. Катод соединяется с отрицательным полюсом источника постоянного напряжения, анод — с положительным его полюсом. При отсутствии света в электрической цепи не протекает электрический ток, так как катод и анод фотоэлемента разделены вакуумным пространством.

При освещении катода освобождаемые с него электроны движутся под действием электрического

поля к аноду и создают в электрической цепи ток (рис. 6). Сила тока пропорциональна мощности светового излучения.

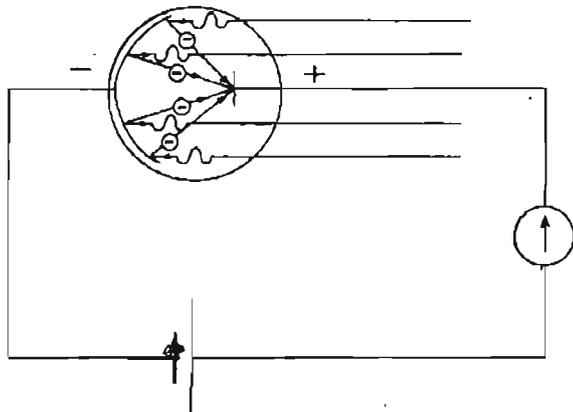


Рис. 6

Фотоэлектрический эффект используется в телевизионных передающих камерах и видеокамерах для преобразования оптических изображений в серии электрических импульсов, которые затем вновь преобразуются в оптические изображения.

### Лабораторные работы

#### Измерение работы выхода электрона при фотоэлектрическом эффекте (уровень Б)

**Цель работы.** Приобретение опыта проведения экспериментальных исследований с применением фотоэлектронных приборов для измерения слабых токов.

**Оборудование.** Вакуумный фотоэлемент в светонепроницаемой коробке с окошком, зеркальный гальванометр или нуль-гальванометр чувствительностью  $\sim 10^{-7} \frac{\text{А}}{\text{дел}}$ , источник постоянного напряжения 5 В, вольтметр, потенциометр, светофильтр.

**Задание.** Определите работу выхода электрона с поверхности катода вакуумного фотоэлемента.

**Содержание работы.** При нормальном режиме работы катод фотоэлемента соединяется с отрицательным полюсом источника постоянного напряжения, анод — с положительным полюсом источника. При отсутствии освещения сила тока в

цепи фотоэлемента равна нулю, так как между катодом и анодом вакуум. При освещении катода светом с длиной волны короче красной границы фотоэффекта в цепи возникает электрический ток. Этот ток создают фотоэлектроны, вырываемые фотонами света из катода (рис. 6).

Сила тока в цепи пропорциональна интенсивности светового потока. Максимальная кинетическая энергия  $E_k$  фотоэлектронов при выходе с поверхности катода определяется уравнением Эйнштейна для фотоэффекта (1.14):

$$E_k = h\nu - A$$

где:  $h$  — постоянная Планка,  
 $\nu$  — частота фотона света,  
 $A$  — работа выхода.

Из уравнения (1.14) следует, что для определения работы выхода  $A$  нужно измерить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов при освещении фотоэлемента светом с известной частотой  $\nu$ :

$$A = h\nu - E_k \quad (1.18)$$

Максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов можно измерить, применив метод задерживающего потенциала. В этом методе катод фотоэлемента соединяется с положительным полюсом регулируемого источника постоянного напряжения, а анод — с отрицательным полюсом. Такое подключение фотоэлемента к источнику напряжения называют обратным подключением. Последовательно с фотоэлементом включается гальванометр — прибор для измерения очень слабых токов (рис. 7).

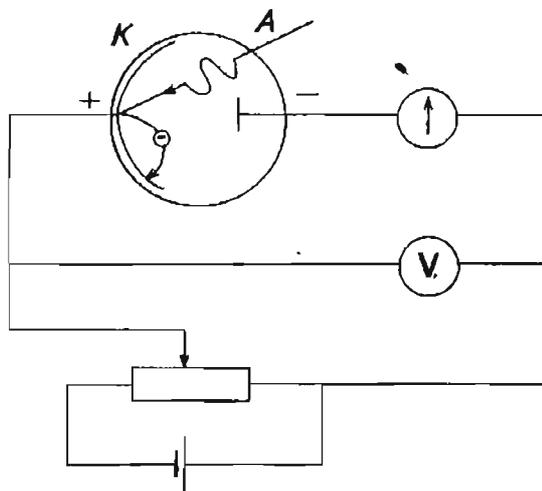


Рис. 7

При выключенном источнике постоянного напряжения при освещении катода в цепи фотоэлемента протекает электрический ток, так как часть освобожденных с катода фотоэлектронов попадает на анод. При плавном увеличении напряжения между катодом и анодом с помощью потенциометра сила тока в цепи фотоэлемента постепенно убывает, так как электрическое поле при обратном подключении фотоэлемента к источнику напряжения препятствует движению электронов от катода к аноду. При некотором значении напряжения  $U$  сила тока в цепи фотоэлемента становится равной нулю. Минимальное значение напряжения, прекращающего ток в цепи фотоэлемента, называется запирающим напряжением. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов  $E_k$  равна работе сил электрического поля, препятствующего движению электронов от катода к аноду:

$$E_k = eU \quad (1.19)$$

Подставив выражение для  $E_k$  из (1.19) в (1.18), получим формулу для вычисления работы выхода электронов:

$$A = h\nu - eU \quad (1.20)$$

Порядок выполнения задания.

1. Соберите электрическую цепь по схеме, представленной на рис. 7. Установите с помощью потенциометра напряжение на фотоэлементе равным нулю. Направьте на фотоэлемент солнечный свет или свет от электрической лампы. Гальванометр в цепи фотоэлемента должен обнаруживать электрический ток.
2. Установите в окошке перед фотоэлементом синий светофильтр. Направьте свет через светофильтр на фотоэлемент. Постепенно увеличивая запирающее напряжение, определите значение запирающего напряжения  $U$ , при котором сила тока в цепи фотоэлемента становится равной нулю.
3. По измеренному значению запирающего напряжения  $U$ , частоте света  $\nu = 7,15 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ , пропускаемого синим светофильтром и известным значениям постоянной Планка  $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  и заряда электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  вычислите работу выхода  $A$  электрона с поверхности катода фотоэлемента. Выразите значение работы выхода в джоулях и электронвольтах.

Результаты измерений и вычислений запишите в отчетную таблицу.

Отчетная таблица

$\nu, \text{с}^{-1}$	$U, \text{В}$	$A, \text{Дж}$	$A, \text{эВ}$

### Исследование явления фотоэлектрического эффекта (уровень В)

**Цель работы.** Приобретение практических навыков изготовления простых физических приборов и проведения с их помощью самостоятельных исследований.

**Оборудование.** Медная или алюминиевая проволока диаметром 2 мм, длиной 0,5 м; металлическая фольга 10 см × 4 см; плоскогубцы, клей для склеивания пластмассы и металла, булавка или игла, пластины из меди, железа, алюминия, свинца или других металлов по выбору; наждачная бумага, источник ультрафиолетового света типа «Фотон» или подобный ему.

#### Задание 1. Изготовление и испытание электрометра

В опытах по наблюдению фотоэлектрического эффекта нужно уметь обнаруживать электрический ток, составляющий миллиардные доли ампера. Такие слабые токи нельзя измерить с помощью миллиамперметра или микроамперметра. Но вместо прибора для измерения силы тока можно воспользоваться значительно более чувствительным прибором для измерения электрического заряда или напряжения – электрометром.

Если вы хотите выполнить опыты по фотоэффекту, то прежде всего необходимо изготовить электрометр. Схема устройства такого самодельного прибора представлена на рисунке 8. Прибор состоит всего из пяти деталей: подставки 1, стойки 2, оси 3, стрелки 4 и шкалы 5. В качестве подставки можно использовать пластину из плексигласа, стеклянное или фарфоровое блюдце. Стойку 2 можно изготовить из медной или алюминиевой проволоки диаметром около двух миллиметров и длиной 40–45 см.

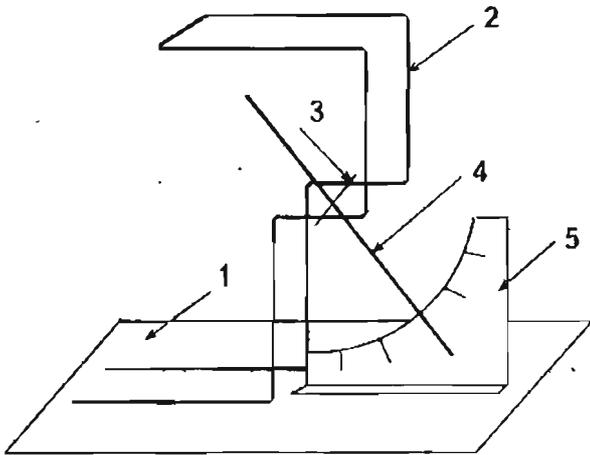


Рис. 8

Кусок проволоки нужно сначала согнуть вдвое, как показано на рисунке 9, расположив две ее половины параллельно на расстоянии 3 см. Затем положите согнутую проволоку на твердую подставку (кусочек мрамора, массивный металлический предмет), положите перпендикулярно ее сторонам около середины тонкий стальной гвоздь и ударьте по нему молотком так, чтобы на сторонах стойки появились вмятины, на которых будет располагаться ось стрелки.

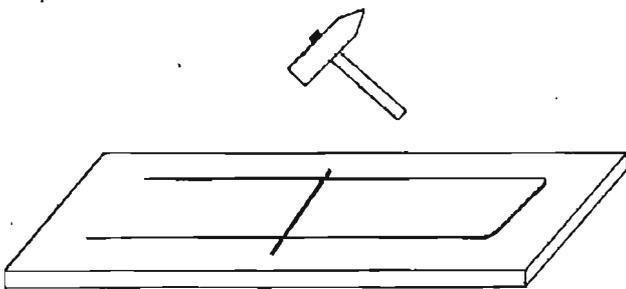


Рис. 9

Затем, используя плоскогубцы, изогните стороны стойки согласно рисунку 8 и добейтесь такой формы, чтобы стойка стояла вертикально на горизонтальной поверхности, а булавка, положенная на выемки в стойке, располагалась горизонтально. После этого приклейте стойку клеем для склеивания металла и керамики к основанию.

Для изготовления стрелки вырежьте из тонкой металлической фольги прямоугольник размером 10 см × 4 см. (Можно использовать фольгу обертки шоколада, фольгу для приготовления жареного мяса в газовых или электрических печах). Покройте одну сторону фольги тонким слоем клея, сложите вдвое вдоль длинной стороны и разгладьте. Повторите эту операцию еще два раза и получите

восьмислойный прямоугольник 10 см × 0,5 см. Приложите к этому прямоугольнику посередине вдоль длинной стороны край линейки и согните его под углом  $90^\circ$ . У вас получится легкая и прочная стрелка электрометра. Посередине стрелки нанесите каплю клея, и когда он начнет затвердевать, положите поперек стрелки в каплю клея булавку или иголку, которая будет служить осью стрелки. Не дожидаясь полного высыхания клея, установите ось стрелки на предназначенное ей место на стойке и слегка изменяя взаимное положение оси и стрелки, добейтесь вертикального расположения стрелки с возможностью свободного вращения ее между сторонами стойки. Шкалу можно изготовить из листка белой бумаги и приклеить к основанию.

Для испытания работоспособности изготовленного электрометра возьмите плексигласовую линейку или другой предмет из пластмассы и потрите куском ткани.

Затем прикоснитесь линейкой к стойке электрометра. Если электрометр работоспособен, его стрелка отклонится от вертикального положения и после нескольких колебаний останется в отклоненном положении. Если же стрелка не отклоняется или сразу же после отклонения снова приходит в вертикальное положение, то ваш прибор для опытов по фотоэффекту не пригоден.

### Задание 2. Использование электрометра в лабораторных исследованиях

Исследуйте, зависит ли скорость разрядки вашего электрометра от освещения металлической пластины на нем ультрафиолетовым светом.

Для выполнения этого опыта приготовьте алюминиевую пластину размером примерно 4 см × 4 см. Если опыт выполняется в домашних условиях, то такую пластину можно вырезать ножницами из стенки банки из-под кока-колы или другого напитка.

При исследовании явления фотоэффекта нужно иметь в виду, что любая металлическая пластина в обычных условиях покрыта слоем окиси металла. Поэтому перед выполнением опыта поверхность пластины нужно очистить с помощью *наждачной бумаги*.

Опыт можно выполнить в следующем порядке.

1) Положите алюминиевую пластину с очищенной поверхностью на стойку электрометра. Натри-

те эбонитовой стержень или плексигласовую линейку куском ткани и прикосновением стержня к стойке сообщите электрометру отрицательный заряд.

- 2) Когда колебания стрелки прекратятся, включите источник ультрафиолетового излучения и направьте свет от него на пластину (рис. 10). Пронаблюдайте, теряет ли отрицательно заряженная пластина электрический заряд под действием света.

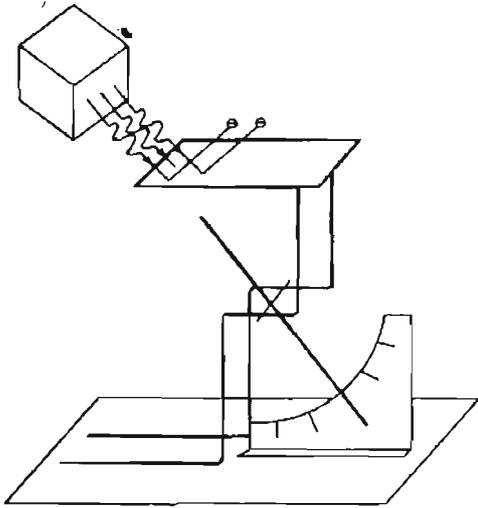


Рис. 10

**ОСТОРОЖНО!** Ультрафиолетовый свет может причинить вред вашим глазам! Направляйте свет только от себя на пластину! Не смотрите на включенный источник без защитной крышки!

- 3) Повторите опыт, изменив знак сообщаемого пластине электрического заряда. Положительный заряд можно получить на поверхности стеклянного стакана или бокала, натирая его сухим листом бумаги. Одинакова ли скорость разрядки электрометра при освещении положительно заряженной и отрицательно заряженной пластины?

Если при освещении отрицательно заряженная пластина теряет заряд быстрее, то вы наблюдали явление фотоэлектрического эффекта. Дайте объяснение результатам вашего опыта.

### Задание 3. Дополнительные опыты

При успешном выполнении задания 2 проделайте аналогичные опыты с пластинами из железа, меди, свинца или других металлов, какие вам удастся найти.

Опыты можно проделывать только с отрицательно заряженными пластинами. Поверхность каждой пластины перед опытом обязательно очистить наждачной шкуркой!

Цель опыта – сравнение силы фототока при одинаковом освещении пластин из металлов с разной работой выхода электронов.

Для сравнения силы фототока достаточно нанести на шкале электрометра две отметки и измерять время движения стрелки электрометра от второй отметки до первой. При одинаковом изменении положения стрелки электрометр теряет одинаковый заряд.

Сила фототока  $I$  равна  $I = \frac{q}{t}$ , поэтому при одинаковых значениях потерянного заряда  $q$  сила фототока больше в тех опытах, в которых меньше время  $t$  разряда.

Сопоставьте полученные в ваших опытах результаты с известными значениями работы выхода электронов с поверхности тел из различных металлов (таблица 1) и сделайте выводы.

Таблица 1

Вещество	Работа выхода электрона, эВ
Алюминий	4.25
Железо	4.31
Золото	4.30
Кадмий	3.8
Литий	2.38
Магний	3.64
Медь	4.4
Натрий	2.35
Никель	4.50
Свинец	4.0
Серебро	4.3
Цезий	1.81
Цинк	4.24

*Контрольные  
работы*

**Тест №1 (уровень А)**

1. В каких атомах имеются электроны?
  - А. В любых атомах.
  - Б. Только в ионизированных атомах.
  - В. Только в атомах металлов.
  - Г. Только в атомах газов.
  - Д. Только в атомах, которым передан отрицательный электрический заряд.
2. Какое примерно значение имеет отношение массы  $m_e$  электрона к массе  $m_H$  атома водорода,  $\frac{m_e}{m_H}$ ?
  - А. 1.
  - Б. 2.
  - В. 2000.
  - Г.  $\frac{1}{20000}$ .
  - Д.  $\frac{1}{2}$ .
3. В каких процессах происходит разделение элементарного электрического заряда на меньшие части?
  - А. Ни в каких процессах разделение не происходит.
  - Б. В процессе прохождения электрического тока в металлах.
  - В. При электрических разрядах в газах, например, в молнии.
  - Г. При радиоактивном распаде атомов.
  - Д. При столкновениях заряженных частиц высокой энергии, в результате которых рождаются новые частицы.
4. Согласно гипотезе Планка, электромагнитное излучение испускается и поглощается квантами. Энергия кванта равна:  $E = h\nu$ . Какой смысл имеют буквы  $h$  и  $\nu$  в этой формуле?
  - А.  $\nu$  – постоянная Планка,  $h$  – частота излучения.
  - Б.  $h$  – постоянная Планка,  $\nu$  – частота излучения.
  - В.  $h$  – высота,  $\nu$  – количество вещества в моль.
  - Г.  $h$  – постоянная Планка,  $\nu$  – количество вещества в моль.
  - Д.  $h$  – длина волны,  $\nu$  – частота.
5. Кто высказал гипотезу о существовании фотонов как частиц электромагнитного излучения?
  - А. Фарадей.
  - Б. Томсон.
  - В. Планк.
  - Г. Ньютон.
  - Д. Эйнштейн.
6. Какой из перечисленных ниже величин пропорциональна энергия фотона?
  - А. Времени излучения.
  - Б. Скорости фотона.
  - В. Частоте излучения.
  - Г. Длине волны.
  - Д. Квадрату скорости фотона.
7. Как называется явление испускания телами электронов под действием падающего на них света?
  - А. Отражение.
  - Б. Фотоэффект.
  - В. Термоэлектронная эмиссия.
  - Г. Электрический разряд.
  - Д. Электризация.
8. Какую энергию приобретает электрон при перемещении в вакууме между точками с разностью потенциалов 5В?
  - А. 0,2 Дж.
  - Б. 5 Дж.
  - В. 0,2 эВ.
  - Г. 5 эВ.
  - Д. Энергия электрона не изменяется.
9. Какое из приведенных ниже выражений определяет максимальную энергию фотоэлектронов?
  - А.  $h\nu$ .

- Б.  $h\nu + A$ .
- В.  $h\nu - A$ .
- Г.  $A - h\nu$ .
- Д.  $\frac{h}{\nu}$ .

10. На поверхность тела с работой выхода электронов 2 эВ падает свет с энергией фотоэлектронов 3 эВ. Каково максимальное значение энергии фотоэлектронов?

- А. Фотоэффект при данной энергии фотонов невозможен.
- Б. 5 эВ.
- В. 3 эВ.
- Г. 2 эВ.
- Д. 1 эВ.

*Самостоятельная  
работа*

### Самостоятельная работа 1 (уровень Б)

1. На рис. 11 графиком представлены результаты экспериментального исследования зависимости максимальной кинетической энергии  $E_k$  фотоэлектронов, освобождаемых с поверхности катода фотоэлемента, от частоты падающего на катод света. Определите по графику значения максимальной кинетической энергии  $E_k$  электронов при освещении катода светом  $\nu_1$ , работу выхода  $A$  и энергию фотона  $h\nu_1$ .

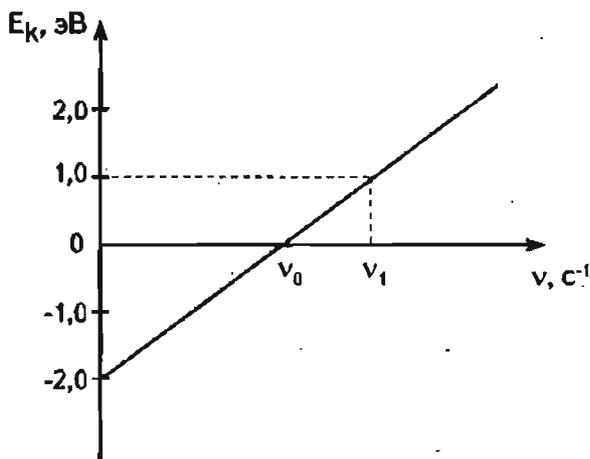


Рис. 11

2. Постройте график зависимости максимальной кинетической энергии  $E_k$  фотоэлектронов от энергии  $h\nu$  фотонов, вызывающих фотоэффект с поверхности тела с работой выхода 4 эВ.
3. При освещении катода фотоэлемента светом с длиной волны 500 нм максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов была равна 0,5 эВ. Определите максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов при освещении этого фотоэлемента светом с длиной волны 250 нм и 1000 нм.
4. Как изменится частота  $\nu$  красной границы фотоэффекта с поверхности металлического шара радиусом  $R$  при сообщении шару положительного заряда  $q$ ?
5. Температура солнечной поверхности равна примерно 6000 К. Поверхностная плотность потока солнечного излучения у границы земной атмосферы равна  $1,36 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ . Какое значение имела бы поверхностная плотность потока излучения у Земли, если бы температура Солнца была равна 9000 К?

*Для тех,  
кому стало интересно*

### Как делаются научные открытия (уровень В)

Ответ на вопрос, как делаются научные открытия, очевиден: открытия делаются по-разному. И все же, как можно открыть вдруг что-то до сих пор никому неизвестное? Есть ли какой-то особый метод делать научные открытия или каждое открытие — дело счастливого случая?

Представление о возможности счастливого случая для совершения научного открытия очень распространено. Оно нашло свое отражение и в легенде о яблоке, случайно упавшем на голову Исаака Ньютона и заставившего его задуматься, как же далеко простирается сила тяжести? Может быть и до самой Луны и заставляет ее двигаться вокруг Земли?

Если даже и был такой случай, разве Ньютону первому упало яблоко на голову? Почему те, кому яблоко падало на голову раньше, не открыли закон всемирного тяготения?

Разве Ньютон первый увидел радугу? Ее видели все его современники и все люди, жившие ранее, но никто из них не открыл явления разложения белого света в спектр, не объяснил происхождения радуги.

Каков же рецепт научного открытия? Конечно, никакого верного рецепта для совершения открытий не существует, но примеры из истории научных открытий могут помочь понять, каков верный путь к научному открытию.

Первыми советами могут служить высказывания Ньютона о его способе совершения научных открытий. Он писал: «Я постоянно держу в уме предмет моего исследования и терпеливо жду, пока слабое утреннее мерцание постепенно и мало-помалу превращается в полный блестящий свет». И далее: «Гений — это терпение мысли, сосредоточенной в известном направлении». Оценивая свои открытия, он писал: «Не знаю, каким я кажусь людям, но я себе представляюсь ребенком, который играет на берегу моря и радуется, когда ему удастся отыскать гладкий камушек или красивую раковину не совсем обыкновенного вида, в то время как неизмеримый океан истин лежит передо мною неисследованным». И еще: «Если я узрел больше других, то только потому, что стоял на плечах гигантов».

Эти высказывания должны помочь понять простую истину, что открыть что-то новое, никому не известное можно только на основе овладения всеми ранее добытыми знаниями, только терпеливым и настойчивым трудом.

### Открытие электрона

К концу XIX века все добытые физикой знания о мире сложились в систему, которую называют **классической физикой**. В основе классической физики лежат экспериментально установленные законы механики, термодинамики и электромагнетизма. Согласно представлениям классической физики весь материальный мир состоит из неизменных и неразрушимых атомов, атомы взаимодействуют между собой с помощью гравитационных и электромагнитных полей.

В этой физической картине мира была одна существенная неясность: что такое электрические заряды?

Являются ли они добавлением к неизменным атомам, подобным окраске тел, или атомы имеют сложное внутреннее строение и электрические заряды входят в их состав?

Майкл Фарадей в 1833 году обнаружил, что при электролизе любого одновалентного вещества выделение одного грамм-атома вещества у одного электрода сопровождается переносом одинакового количества электричества равного  $q = 96485$  кулон. На основании открытого закона электролиза он высказал гипотезу о существовании элементарного электрического заряда, одинакового у всех одновалентных ионов.

Для нахождения значения элементарного электрического заряда  $e$  нужно разделить количество электричества  $q$  на число атомов  $N$  в одном грамм-атоме:

$$e = \frac{q}{N} = \frac{96485}{6,022 \cdot 10^{23}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Если гипотеза о существовании элементарного электрического заряда  $e$  справедлива, то кроме нейтральных атомов вещества в мире должны существовать своеобразные «атомы электричества» — элементарные отрицательные и положительные электрические заряды.

Электрические заряды, не связанные с атомами, были обнаружены в конце XIX века при изучении электрического разряда в газах. В разрядной трубке в области за анодом наблюдалось свечение стекла. Это свечение вызывалось действием какого-то излучения или потока частиц, идущих от катода к аноду. Это излучение называли **катодными лучами**. Французский физик Жан Перрен установил, что катодные лучи являются потоком частиц с отрицательным электрическим зарядом. Английский физик Джозеф Томсон в 1897 году исследовал влияние электрического и магнитного полей на катодные лучи. Устройство использованного им прибора представлено на рис. 12. Он обнаружил, что отношение электрического заряда к массе у всех частиц катодных лучей одинаково и примерно в 2000 раз больше, чем у самого легкого из ионов — иона водорода. Отсюда следовало, что если частица катодных лучей обладает элементарным электрическим зарядом  $e$ , то ее масса  $m_e$  должна быть примерно в 2000 раз меньше массы атома водорода.

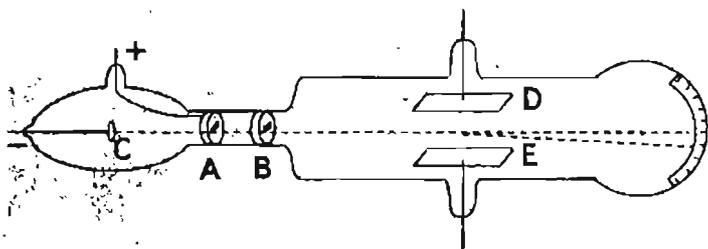


Рис. 12

Катодные лучи возникают при электрическом разряде в любом газе и обладают одинаковыми свойствами. Следовательно отрицательно заряженные частицы с малой массой  $m_e$  имеются в составе любых атомов. Эти частицы назвали электронами.

В опытах Дж. Дж. Томсона была доказана только одинаковость отношения электрического заряда  $e$

к массе  $m_e$  электрона  $\frac{e}{m_e} = const$ . Для доказательства

одинаковости зарядов у всех электронов и, следовательно, одинаковости их масс, нужно было выполнить измерение электрических зарядов отдельных электронов.

Такие измерения выполнил в 1909–1912 году американский физик Роберт Милликен. Он исследовал движение микроскопических капель масла в однородном электрическом поле между пластинами конденсатора. Скорость движения капли зависела от действия силы тяжести и кулоновской силы, если капля имела электрический заряд. Электрический заряд капли приобретали в результате присоединения иона, возникающего в результате ионизации воздуха в пространстве между пластинами конденсатора. В опытах Милликена было установлено, что заряды капель изменяются всегда только на величину, кратную элементарному электрическому заряду  $e$ . Этот заряд одинаков у всех электронов и не делится на части ни в каких процессах.

### Открытие рентгеновских лучей

*Как не упустить счастливый случай*

Открытие рентгеновских лучей было одним из важнейших открытий девятнадцатого века. За это открытие Вильгельм Конрад Рентген в 1901 году получил Нобелевскую премию. Это была первая Нобелевская премия по физике.

Как было сделано это выдающееся открытие?

Поздно вечером 8 ноября 1895 года Рентген работал в своей лаборатории. Он начинал исследования в новой для него области физики электрического разряда в разреженных газах. В его распоряжении было самое простое оборудование, с каким уже несколько лет работали другие физики в нескольких десятках лабораторий. Основными приборами были стеклянная трубка с двумя металлическими электродами внутри и трансформатор. Из трубки был выкачан почти весь воздух и при подаче высокого напряжения с выхода трансформатора между электродами возникал электрический разряд.

Когда часы пробили одиннадцать, Рентген решил закончить работу. Выключив свет, он заметил в темной комнате на лабораторном стекле какое-то светлое пятно. Подойдя к столу, он увидел, что светятся лежащие на столе кристаллы платиноцианистого бария. Было известно, что эти кристаллы способны светиться короткое время после их освещения солнечным светом. Но здесь они светились в темноте без предварительного освещения.

И тут Рентген заметил, что забыл выключить напряжение, подаваемое на газоразрядную трубку на соседнем столе. Он выключил напряжение и тотчас свечение кристаллов прекратилось. Включил напряжение — кристаллы вновь засветились.

Рентген продолжал опыты до утра. А утром он распорядился принести в лабораторию походную кровать, хотя его спальня находилась в том же доме этажом выше. Окна лаборатории были завешены черными шторами. Людям, приносящим пищу в лабораторию, было запрещено разговаривать.

Не выходя из лаборатории, Рентген продолжал опыты 50 суток. 28 декабря он представил рукопись сообщения об открытии нового вида лучей, способных проходить через непрозрачные для света материалы и давать на фотопластинке изображение внутренних органов человека.

Итак, научное открытие — дело счастливого случая? Не забудь Рентген выключить напряжение на трубке, не будь случайно нужных кристаллов на соседнем столе мы бы сегодня и не знали о существовании «рентгеновского» излучения, не имели рентгеновских аппаратов для медицинских обследований и лечения? Конечно, нет. Случай лишь немного приближает или отдаляет момент открытия.

Нужно понять, что Рентген случайно заметил лишь свечение кристаллов. Но это не есть научное открытие, это лишь случайное наблюдение. Подобные странные явления, происходящие вблизи работающих газоразрядных трубок, наблюдали несколько ученых до Рентгена и даже сообщали о своих наблюдениях в заметках в научных журналах. Но никто из них не понял, что Природа предоставляет им редкий случай сделать значительное научное открытие. А Рентген сразу понял важность случайного наблюдения и целенаправленными экспериментами выяснил природу нового физического явления.

Рентген обнаружил способность нового излучения действовать на фотопластинку и сделал первые «рентгеновские» снимки руки человека (рис. 13), открыл способность нового излучения разряжать заряженный электроскоп, исследовал проникающую способность излучения и многие другие его свойства. За пятьдесят суток почти непрерывных экспериментов он настолько глубоко и полно исследовал все основные свойства нового излучения, что на протяжении десятков лет после публикации его трех коротких статей десяткам ученых, исследовавшим новое явление, не удалось опровергнуть, исправить или дополнить сформулированные Рен-

тгеном тридцать два тезиса о свойствах нового излучения.



Рис. 13

В возможность столь исчерпывающего исследования совершенно нового явления одним человеком за столь короткое время было очень трудно поверить. Рассказывают, что и знаменитый американский ученый и изобретатель Томас Эдисон, узнав об открытии Рентгена, несколько дней и ночей без отдыха проработал в своей лаборатории, повторяя опыты Рентгена. Он подтвердил все открытия Рентгена, но найти что-то еще существенно новое в этой области и ему не удалось.



### Изучив эту тему,

- ♦ вы узнаете, что такое радиоактивность и какие виды радиоактивных излучений существуют;
- ♦ поймете, почему открытие явления радиоактивности опровергло представление об атомах, как о неизменных и неразрушимых частицах;
- ♦ научитесь пользоваться камерой Вильсона и счетчиком Гейгера-Мюллера для обнаружения радиоактивных излучений.

### Основные понятия:

Радиоактивность ♦ Альфа-излучение ♦ Бета-излучение ♦ Гамма-излучение ♦ Активность ♦ Методы регистрации радиоактивных излучений ♦ Сцинтилляционный счетчик ♦ Счетчик Гейгера-Мюллера ♦ Камера Вильсона ♦ Метод фотоэмульсий ♦ Электронметр ♦ Сцинтилляционный метод

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

### Радиоактивность и радиоактивные излучения (уровень А)

Наибольшие успехи в исследовании строения атомов были достигнуты после открытия явления радиоактивности.

Явление радиоактивности открыл в 1896 г. французский физик Анри Беккерель. Он обнаружил, что уран и его соединения постоянно испускают невидимые излучения, способные проходить через значительные слои вещества и действовать на фотопластинку. На рис. 14 представлен результат действия на фотопленку радиоактивных излучений куска урановой руды.

В 1902 году английские ученые Эрнест Резерфорд и Фредерик Содди открыли, что радиоактивное излучение является результатом самопроизвольного превращения атомов одного химического элемента в атомы другого химического элемента.

Открытие явления радиоактивного распада опровергло представление об атомах как мельчайших частицах вещества, не способных ни к каким изменениям и превращениям.

Исследования явления радиоактивности показали, что существует три вида радиоактивных излучений. Их обозначили буквами греческого алфавита

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и называют соответственно альфа-излучением, бета-излучением и гамма-излучением. **Альфа-излучение** есть поток положительно заряженных частиц, двухзарядных ионов гелия. **Бета-излучение** есть поток отрицательно заряженных частиц — электронов. **Гамма-излучение** является потоком квантов электромагнитного излучения с очень большой энергией.



Рис. 14

Радиоактивность источника характеризуется физической величиной, называемой **активностью**. Активность определяет количество распадов, происходящих в источнике за единицу времени.

Единица активности в СИ называется беккерель (Бк). При активности в 1 Бк в радиоактивном источнике происходит один распад за одну секунду.

Внесистемная единица кюри (Ки) равна активности источника, в котором за 1 секунду происходит  $3,7 \cdot 10^{10}$  распадов. Такой активностью обладает 1 грамм радия.

При прохождении через любое вещество радиоактивные излучения ионизируют и возбуждают атомы вещества. Эти действия излучений на вещество используются в различных приборах для регистрации радиоактивных излучений.

Способность ионизирующих частиц вызывать вспышку света в некоторых кристаллах используется в **сцинтилляционных счетчиках**.

В **счетчике Гейгера–Мюллера** при прохождении ионизирующей частицы в результате ионизации газа возникает кратковременный импульс электрического тока.

Импульс тока можно регистрировать электронными приборами.

В **камере Вильсона** частицы пролетают через газ с пересыщенным водяным паром и оставляют след

из мелких капель воды. На рисунке 15 представлена фотография следов альфа-частиц в камере Вильсона.

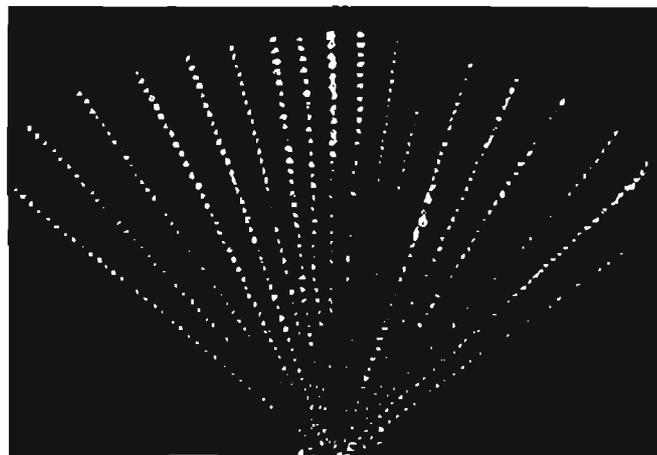


Рис. 15

*Экспериментальные исследования*

### **Обнаружение явления естественной радиоактивности (выполняется в классе, уровень А)**

**Цель работы.** Приобретение умений использования счетчика Гейгера–Мюллера для обнаружения радиоактивности.

**Оборудование.** Счетчик Гейгера–Мюллера с регистрирующим устройством, набор различных химических соединений, набор минералов:

**Задание.** Исследуйте, обладают ли радиоактивностью имеющиеся соединения и минералы (среди химических соединений обязательно должно быть какое-либо соединение калия, например, хлорид калия, KCl).

**Содержание работы.**

В настоящее время в окружающем мире могут быть обнаружены предметы и материалы, содержащие как естественные радиоактивные изотопы, так и радиоактивные изотопы искусственного происхождения. Обнаружение и измерение радиоактивности сегодня является не только научной проблемой, но и важной практической задачей для предупреждения опасности облучения. Одним из самых простых приборов для обнаружения радиоактивных излучений является счетчик Гейгера–Мюллера. Этот счетчик регистрирует каждую пролетевшую через его рабочий объем быструю заряженную частицу.

Такая высокая чувствительность прибора обуславливает одну его особенность: при включении счетчик Гейгера-Мюллера везде и всегда обнаруживает наличие радиоактивности. Этому не следует удивляться и не нужно пугаться, если ваш счетчик регистрирует 20–40 частиц в минуту: счетчик регистрирует естественный радиационный фон.

Естественный фон создается естественными радиоактивными изотопами урана, тория, калия и некоторых других элементов, содержащимися в земной коре и в стенах зданий, изотопами углерода и радона в воздухе, космическими лучами.

Естественный фон создает определенную трудность при попытке обнаружения радиоактивности исследуемых образцов с небольшой активностью. Для измерения радиоактивности образца нужно сначала измерить за определенный интервал времени  $\Delta t$  число регистрируемых частиц  $N_\phi$  от естественного фона, затем за такой же интервал времени  $\Delta t$  число регистрируемых частиц  $N$  от образца с фоном и найти число  $N_0$  частиц, зарегистрированных от образца, как разность  $N - N_\phi$ :

$$N_0 = N - N_\phi \quad (2.1)$$

Так как радиоактивный распад каждого атома происходит случайным образом, случайным образом изменяется со временем число частиц, регистрируемых счетчиком за одинаковые интервалы времени.

При регистрации  $N$  случайных событий среднее статистическое отклонение  $\Delta N$  от среднего значения  $N_{cp}$  равно корню квадратному из числа  $N$  зарегистрированных событий:

$$\Delta N = \sqrt{N} \quad (2.2)$$

Поэтому с большой уверенностью можно сказать, что образец под счетчиком является радиоактивным, если число  $N$  зарегистрированных частиц от образца с фоном отличается от числа  $N_\phi$  зарегистрированных частиц фона только в том случае, если разность  $N - N_\phi$  больше суммы средних статистических ошибок измерений  $N$  и  $N_\phi$ :

$$N - N_\phi > \sqrt{N} + \sqrt{N_\phi} \quad (2.3)$$

Порядок выполнения задания

1. Приготовьте счетчик Гейгера-Мюллера к работе (рис. 16). Включите счетчик и одновременно запустите секундомер. Определите, сколько частиц регистрирует счетчик за 10 минут при от-

сутствии каких-либо образцов около него — фон счетчика  $N_\phi$ .

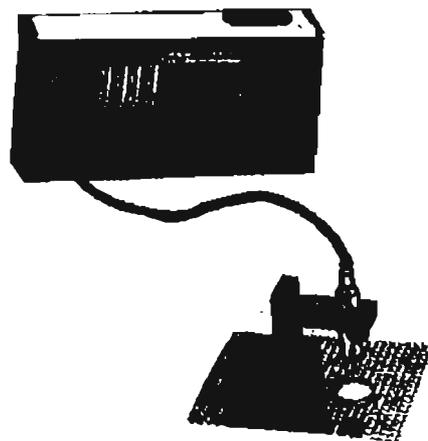


Рис. 16

2. Поместите под счетчик первый исследуемый образец и определите число  $N_1$  частиц, регистрируемых счетчиком за 10 минут. Вычислите разность  $N_1 - N_\phi$ , сумму  $\sqrt{N_1} + \sqrt{N_\phi}$  и сравните их значения. Сделайте вывод, содержит ли исследуемый образец №1 радиоактивные изотопы.

Повторите аналогичным образом измерения и вычисления с остальными имеющимися образцами №1, №2, №3 и так далее.

Сделайте выводы о наличии или отсутствии в них заметного количества радиоактивных изотопов.

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

### Методы регистрации частиц (уровень Б)

Открытие нового физического явления — явления радиоактивности — потребовало разработки физических приборов и методов для регистрации частиц, испускаемых радиоактивными веществами, измерений зарядов, масс и энергии частиц.

Исторически первым методом регистрации радиоактивных излучений был метод фотоэмульсий. В опытах Беккереля была обнаружена способность радиоактивных излучений воздействовать на фотографическую эмульсию и создавать в ней скрытое изображение. Скрытое изображение становится видимым после проявления фотоэмульсии. Фотоэмульсии применяются для регистрации треков движения заряженных частиц в веществе, для измерений доз радиоактивного излучения.

Мария Кюри использовала для обнаружения радиоактивных излучений обыкновенный электрометр. Заряженный электрометр в сухом чистом воздухе не изменяет показаний на протяжении многих часов. Если же вблизи электрометра находится радиоактивное вещество, то радиоактивные излучения ионизируют воздух. Ионы противоположного заряду электрометра знака притягиваются к электрометру и постепенно нейтрализуют его заряд.

Прибор с маленьким электрометром в металлической трубке может использоваться для измерения доз рентгеновского или гамма-излучения, получаемых человеком (рис. 17).

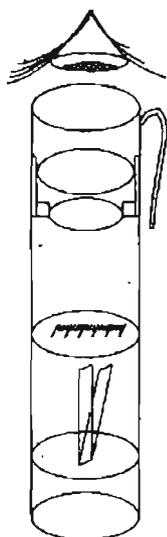


Рис. 17

Электрометр заряжается и его показания наблюдаются через встроенный в трубку микроскоп. Если человек с дозиметром попадает в зону действия рентгеновского или гамма-излучения, отклонение стрелки электрометра постепенно уменьшается. Шкала электрометра градуируется в единицах дозы излучения.

Альфа-частицы и бета-частицы при попадании в некоторые кристаллы вызывают вспышки света. Метод регистрации быстрых заряженных частиц по вызываемым ими вспышкам света в кристаллах называется **сцинтилляционным методом**, а кристаллы, отвечающие вспышкой света на прохождение через них быстрых заряженных частиц, называются **сцинтилляционными кристаллами**.

Интенсивность светового излучения в сцинтилляционном кристалле пропорциональна энергии заре-

гистрированной частицы. Поэтому измеряя интенсивность световых вспышек в кристаллах, можно измерять энергию заряженных частиц.

Фотон света в результате фотоэффекта освобождает электроны с фотокатода фотоумножителя. Далее поток электронов движется под действием электрического поля, усиливается при ударах электронов о поверхность электродов и регистрируется электронным устройством (рис. 18).

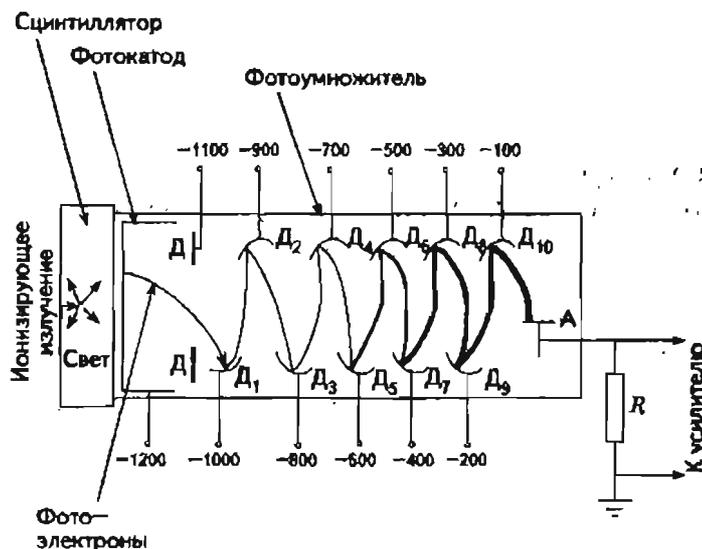


Рис. 18

В счетчике Гейгера-Мюллера основными частями являются цилиндрическая трубка из проводящего материала и тонкая металлическая проволока, укрепленная по оси цилиндрической трубки (рис. 19).

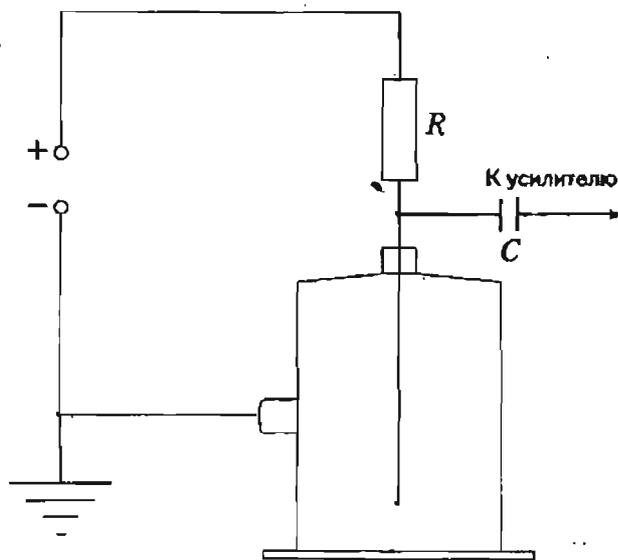


Рис. 19

Трубка и проволока изолированы друг от друга, пространство между трубкой и проволокой заполнено специальной смесью газов при низком давлении. Для регистрации радиоактивных излучений счетчик Гейгера–Мюллера подключается к источнику постоянного напряжения, последовательно со счетчиком включается резистор  $R$  с электрическим сопротивлением несколько мегаом. Трубка счетчика соединяется с отрицательным полюсом источника напряжения, нить — с положительным полюсом. Поэтому трубку называют катодом, а проволоку — анодом счетчика.

Напряжение между катодом и анодом счетчика устанавливается равным значению, необходимому для начала самостоятельного электрического разряда в газе. Для различных типов счетчиков рабочее напряжение бывает от 380 вольт до 2000 вольт.

Хотя напряжение на счетчике достаточно для начала электрического разряда в газе, разряд не возникает до тех пор, пока в газе, заполняющем счетчик, не появится хотя бы один свободный электрон, способный начать процесс ионизации газа. Свободные электроны в газе могут возникнуть под действием быстрых заряженных частиц радиоактивного излучения или гамма-квантов, проникающих в рабочий объем счетчика. Свободные электроны, возникшие в результате ионизации газа частицей радиоактивного излучения, под действием электрического поля движутся от катода к аноду. Вблизи анода счетчика напряженность настолько велика, что начинается лавинный процесс ионизации атомов электронным ударом и электрический разряд примерно за  $10^{-7}$  секунды распространяется на весь объем счетчика. После распространения по всему объему счетчика процесс электрического разряда сам собою прекращается из-за того, что возникшие в процессе развития электронных лавин положительные ионы полностью окружают анод и снижают напряженность электрического поля. Положительные ионы достигают катода и нейтрализуются на нем примерно через  $10^{-4}$  секунды после вспышки разряда.

После этого счетчик вновь готов к регистрации частиц. Для того, чтобы при нейтрализации положительных ионов с катода не освободились новые электроны и электрический разряд сам собою не продолжался, счетчик заполняется специальной смесью газов.

При попадании ионизирующей частицы в рабочий объем счетчика и вспышке разряда в электрической цепи счетчика протекает кратковременный импульс электрического тока. Этот импульс тока создает на последовательно включенном резисторе  $R$  импульс напряжения. Импульс напряжения с резистора  $R$  через конденсатор  $C$  подается на электронное устройство, осуществляющее автоматический счет импульсов или выдающее звуковые сигналы.

Возможность наблюдать невооруженным глазом следы быстрых заряженных частиц дает камера Вильсона. Принцип действия камеры Вильсона основан на использовании способности ионов служить центрами конденсации пересыщенного водяного пара.

Камера Вильсона представляет собой сосуд, заполненный воздухом или каким-то другим газом в смеси с насыщенным водяным паром. Для приведения камеры в действие с помощью специального устройства в ней резко понижается давление и происходит адиабатное расширение газа. При адиабатном расширении температура газа понижается и водяной пар становится пересыщенным.

Если газ в камере предварительно очищен от ионов, то при пролетании в газе быстрой заряженной частицы, ионизирующей молекулы газа, вдоль всего пути ее движения образуется след из мелких капель воды, сконденсировавшихся на ионах. Этот след называется треком частицы.

Поместив камеру Вильсона в магнитное поле, можно по результатам влияния магнитного поля на движение изучаемых частиц определять их скорость (рис. 20).



Рис. 20

*Лабораторная  
работа***Наблюдение следов  $\alpha$ -частиц с помощью камеры Вильсона (уровень Б)**

**Цель работы.** Знакомство с методом регистрации ядерных излучений с помощью камеры Вильсона.

**Оборудование.** Камера Вильсона,  $\alpha$ -радиоактивный источник, спирт, вода, источник света.

**Задание.** Приведите в действие камеру Вильсона и пронаблюдайте следы  $\alpha$ -частиц.

**Содержание работы.**

Школьная камера Вильсона состоит из цилиндрического пластмассового кольца с двумя прозрачными крышками из органического стекла и резиновой груши с соединительной трубкой. Внутри камеры на конце стержня находится альфа-радиоактивный препарат (рис. 21).

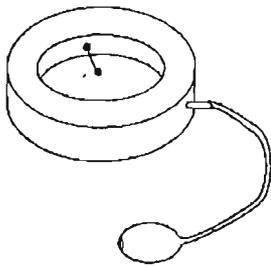


Рис. 21

Следы альфа-частиц легче получить, если кроме паров воды в камере находятся еще и насыщенные пары спирта. Приведение камеры в действие осуществляется путем медленного сжатия резиновой груши для повышения давления газа и затем резкого отпускания груши для его адиабатического расширения.

Воздух в камере находится под действием естественного радиоактивного фона, поэтому во всем объеме камеры постоянно возникают ионы. Если эти ионы предварительно не удалить, то при резком понижении давления в камере весь ее объем заполняется туманом из мелких капель воды.

Для удаления ранее возникших в камере Вильсона ионов используется электрическое поле. В школьной камере это электрическое поле создается простым натиранием верхней крышки куском шерстяной или шелковой ткани. При натирании крышка электризуется и электрическое поле освобождает

рабочий объем камеры от всех ранее возникших ионов.

**Порядок выполнения работы.**

1. Для заполнения камеры насыщенными парами воды и спирта в грушу с помощью пипетки капните одну каплю смеси воды со спиртом. Затем сделайте несколько сжатий груши без соединения ее с камерой для удаления излишков жидкости. Затем через резиновую трубку соедините грушу с камерой. Сделайте несколько сжатий и отпуская груши для заполнения объема камеры смесью паров воды и спирта.
2. Опыт с камерой Вильсона лучше проводить в затемненной комнате. Положите камеру на стол, поместив под нее кусок черной ткани или лист черной бумаги. Осветите камеру сверху таким образом, чтобы отраженный от крышки свет не попадал в глаза наблюдателей и пространство под крышкой выглядело черным.
3. Потрите верхнюю крышку камеры куском шерстяной ткани для создания очищающего электрического поля.
4. Медленно сожмите грушу, затем резко отпустите ее и наблюдайте следы альфа-частиц.

Если вместо треков вы наблюдаете туман во всем объеме камеры, то это значит сжатие груши было слишком сильным. Повторите опыт, ослабив степень сжатия груши.

Если в камере не наблюдалось ни треков, ни тумана, то это значит, что сжатие груши было слабым. Повторите опыт, усилив степень сжатия груши.

*Конспект.*

*Таблицы. Ссылки.*

**Закон радиоактивного распада (уровень Б)**

Опыты показали, что процесс самопроизвольного радиоактивного превращения атомов всех радиоактивных веществ происходит по закону радиоактивного распада. Закон радиоактивного распада имеет следующее математическое выражение:

$$N_t = N_0 2^{-\frac{t}{T}} \quad (2.4)$$

где:  $N_0$  – число радиоактивных атомов в момент времени  $t = 0$ ;  $N_t$  – число радиоактивных атомов в

момент времени  $t$ ,  $T$  — особая для каждого вида радиоактивных атомов постоянная, называемая периодом полураспада, потому что, как следует из формулы (2.4), через время  $t = T$  после начала наблюдения первоначальное количество радиоактивных атомов убывает в два раза:

$$N_T = N_0 2^{-\frac{t}{T}} = N_0 \cdot 2^{-1} = \frac{N_0}{2}$$

График зависимости числа  $N_t$  радиоактивных атомов от времени  $t$ , выраженного в периодах полураспада  $T$ , для всех радиоактивных атомов одинаков (рис. 22). Однако период полураспада может иметь значения от тысячных долей секунды до миллиардов лет.

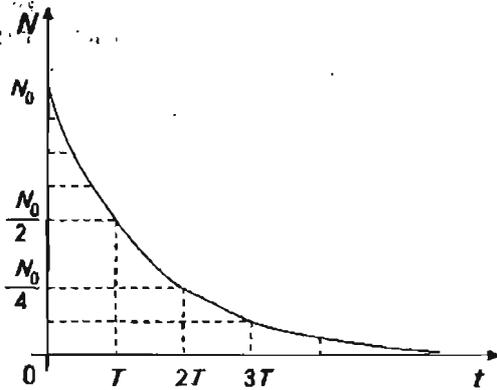


Рис. 22

Закон радиоактивного распада является статистическим законом. Статистические законы описывают явления, в которых происходят случайные события. Момент времени, в который произойдет одно случайное событие, непредсказуем, но, наблюдая большое число однородных событий, можно определить вероятность события в единицу времени. Зная вероятность события в единицу времени, можно вычислить вероятное число событий за определенный интервал времени. Закон радиоактивного распада позволяет вычислить не точное число  $N_t$  радиоактивных атомов в момент времени  $t$ , а наиболее вероятное значение числа атомов в момент времени  $t$ .

Число атомов  $N_t$  не может изменяться непрерывно, при каждом распаде оно изменяется скачком на единицу. Кривая распада в действительности является не гладкой кривой, а ступенчатой линией (рис. 23). При большом числе участвующих в процессе атомов ступеньки не заметны, с уменьшением числа атомов квантовый характер распада проявляется все более явно.

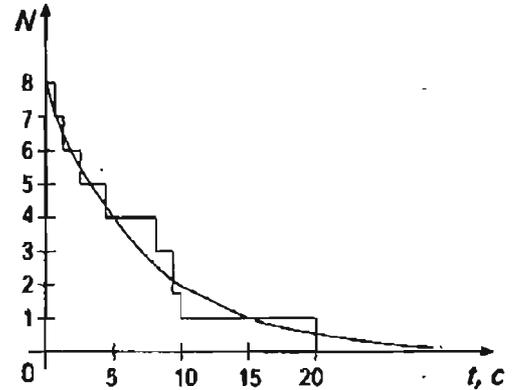


Рис. 23

Закон радиоактивного распада можно вывести теоретически, используя гипотезу о случайном статистическом характере радиоактивного распада каждого атома. Если каждый атом имеет одинаковую вероятность  $\lambda$  испытать радиоактивный распад в единицу времени, то ожидаемое число распадов  $\Delta N$  из  $N$  атомов за интервал времени  $\Delta t$  равно:

$$\Delta N = \lambda \cdot N \cdot \Delta t \quad (2.5)$$

Постоянную  $\lambda$  называют постоянной распада. Из (2.5) следует, что при большом числе радиоактивных атомов  $N$  одного вида активность  $A$  радиоактивного образца, определяющая число радиоактивных распадов в единицу времени, равна:

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda \cdot N \quad (2.6)$$

Переходя к бесконечно малым изменениям  $t$  и  $N$  и учитывая знаком минус процесс убывания  $N$  с распадом, получим:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N \quad (2.7)$$

После разделения переменных имеем:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda \cdot dt \quad (2.8)$$

После интегрирования:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.9)$$

Легко доказать, что:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} \quad (2.10)$$

Подставляя (2.10) в (2.9), получим закон радиоактивного распада в форме (2.4).

*Экспериментальные  
задания*

### Измерение периода полураспада естественного радиоактивного изотопа калия 40 (уровень В)

**Цель работы.** Знакомство с методом определения периода полураспада долгоживущего радиоактивного изотопа.

**Оборудование.** Радиометр с торцовым счетчиком Гейгера–Мюллера, соль калия, весы, секундомер, линейка.

**Задание.** Определите период полураспада естественного радиоактивного изотопа калия  $^{40}_{19}\text{K}$ .

**Содержание работы.**

Период полураспада короткоживущего радиоактивного изотопа можно узнать, определив экспериментально интервал времени, за который активность препарата убывает вдвое. Для радиоактивных изотопов, период полураспада которых измеряется миллионами или миллиардами лет, этот метод неприменим. Для определения периода полураспада долгоживущего изотопа может быть использован другой метод.

Активность препарата равна произведению постоянной распада  $\lambda$  данного изотопа на число  $N$  радиоактивных атомов в препарате:

$$A = \lambda \cdot N$$

Постоянная распада  $\lambda$  связана с периодом полураспада  $T$  выражением:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} \quad (2.10),$$

где  $\ln 2$  – натуральный логарифм 2, равный примерно  $\ln 2 \approx 0,693$ .

Из (2.6) и (2.10) период полураспада  $T$  равен:

$$T = \frac{N \cdot \ln 2}{A} \approx \frac{N \cdot 0,693}{A} \quad (2.11).$$

Таким образом, для определения периода полураспада  $T$  долгоживущего изотопа нужно знать число  $N$  атомов этого изотопа в препарате и измерить активность  $A$  препарата, то есть число радиоактивных распадов за одну секунду.

Число атомов  $N$  в препарате известного химического состава можно найти, измерив массу  $m$  препарата.

Изотоп калия 40 является бета-радиоактивным изотопом.

Для определения активности препарата, содержащего калий 40, можно использовать радиометр с торцовым счетчиком Гейгера–Мюллера.

При определении активности препарата необходимо учесть, что не все образующиеся при радиоактивном распаде бета-частицы попадают в рабочий объем счетчика и внести необходимые поправки. Первая необходимая поправка – поправка на телесный угол.

Чтобы найти полное число  $A_n$  бета-частиц, вылетающих из образца по всем направлениям, по числу  $A$  частиц, зарегистрированных счетчиком, необходимо учесть, какая доля частиц вылетает из образца в пределах телесного угла, ограничивающего входное окно счетчика:

$$A_n = \frac{A}{\omega} \quad (2.12)$$

Для образца малых размеров, находящегося на расстоянии  $h$  от окошка счетчика, поправка  $\omega$  на телесный угол может быть найдена как отношение площади поверхности  $S_1$  шарового сегмента над окошком счетчика к площади шара  $S_0$  радиусом  $R$  равным расстоянию от центра препарата до края окошка счетчика (рис. 24).

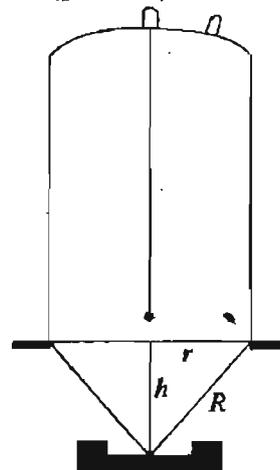


Рис. 24

$$\omega = \frac{S_1}{S_0} = \frac{2\pi R(R-h)}{4\pi R^2} = \frac{R-h}{2R} = 0,5 - \frac{h}{2R} \quad (2.13)$$

Радиус  $R$  шара можно выразить через расстояние  $h$  от препарата до окошка счетчика и радиус  $r$  окошка этого счетчика:

$R = \sqrt{h^2 + r^2}$ , тогда

$$\omega = 0,5 \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r^2}{h^2}}} \right] \quad (2.14)$$

Вторая необходимая поправка — поправка, учитывающая поглощение части бета-частиц в самом радиоактивном препарате.

Порядок выполнения работы

1. Включите радиометр и измерьте число  $N_\phi$  импульсов, зарегистрированных за 10 минут. Вычислите фон  $A_\phi$  установки в импульсах в минуту

$$A_\phi = \frac{N_\phi}{10}$$

2. Поместите радиоактивный препарат под окошко счетчика. Измерьте число импульсов  $N_1$ , зарегистрированных установкой за 10 минут. Вычислите скорость счета  $A_1$  от препарата с фоном в импульсах в минуту.

Вычислите скорость счета  $A$  от препарата без фона:

$$A = A_1 - A_\phi$$

3. Приготовьте препараты KCl массой 2,0 г; 1,5 г; 1,0 г; 0,5 г и 0,25 г. Устанавливая поочередно эти препараты под счетчик, определите скорость счета от препарата с фоном при различных значениях его массы.

Вычислите скорость счета  $A$  от препарата без фона при различных значениях массы.

Вычислите удельную скорость счета от препарата, разделив скорость счета  $A$  на массу  $m$  препарата,  $\frac{A}{m}$ . Результаты измерений и вычислений занесите в отчетную таблицу.

Отчетная таблица

$m, \text{ г}$	2,0	1,5	1,0	0,5	0,25
$A_1, \frac{\text{имп}}{\text{мин}}$					
$A = A_1 - A_\phi, \frac{\text{имп}}{\text{мин}}$					
$\frac{A}{m}, \frac{\text{имп}}{\text{мин} \cdot \text{г}}$					

4. Постройте график зависимости удельной скорости счета от препарата от массы препарата. Экстраполируя экспериментальную кривую к значению массы  $m = 0$  г, получите значение  $\frac{A}{m}$  удельного счета от препарата без самопоглощения бета-излучения в препарате.
5. Измерьте расстояние  $h$  от препарата до окошка счетчика и радиус  $R$  окошка счетчика. Вычислите поправку  $\omega$  на телесный угол и бета-активность  $A_n$  одного грамма соединения KCl:

$$A_n = \frac{A \cdot 1 \text{ г}}{m \cdot \omega}$$

6. Вычислите количество атомов  $N$  калия 40 в 1 г KCl. При вычислении необходимо учесть, что в природном калии содержится 0,0119% атомов калия 40. Так как атомная масса природного калия равна 39,1, а хлора 35,5, то масса  $m_1$  калия в 1 г соединения KCl равна:

$$m_1 = \frac{1 \text{ г} \cdot 39,1}{39,1 + 35,5} \approx 0,524 \text{ г}$$

Масса  $m_2$  изотопа калия 40 в 1 г препарата равна:

$$m_2 = m_1 \cdot 0,000119 = 6,24 \cdot 10^{-5} \text{ г}$$

Число  $n$  атомов калия 40 в 1 г препарата равно:

$$n = v \cdot N_A = \frac{m_2}{M} \cdot N_A,$$

$$n \approx \frac{6,24 \cdot 10^{-5} \text{ г} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}}{40 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}} \approx 9,4 \cdot 10^{17}$$

7. Подставив найденные значения активности  $A$  и числа  $N$  атомов в 1 г препарата в формулу (2.11), вычислите период полураспада изотопа калия 40.

Полученный результат в секундах переведите в годы:

$$1 \text{ год} \approx 365,26 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ с} \approx 3,16 \cdot 10^7 \text{ с}.$$

*Контрольная  
работа***Тест №2 (уровень А)**

1. Кто открыл явление радиоактивности?

- А. М. Кюри.
- Б. Н. Бор.
- В. Дж. Томсон.
- Г. Э. Резерфорд.
- Д. А. Беккерель.

2. По какому действию было открыто явление радиоактивности?

- А. По действию на фотопластинку.
- Б. По ионизирующему действию на воздух.
- В. По вспышкам света, вызываемым в кристаллах ударами частиц.
- Г. По следам в камере Вильсона.
- Д. По импульсам тока в счетчике Гейгера-Мюллера.

3. Изменяется ли атом в результате радиоактивного распада?

- А. Атом не изменяется.
- Б. Изменяется запас энергии атома, но атом остается атомом того же химического элемента.
- В. Атом изменяется, превращается в атом другого химического элемента.
- Г. Атом на короткое время изменяется, но очень быстро возвращается в прежнее исходное состояние.
- Д. В результате радиоактивного распада атом полностью исчезает.

4. Что такое альфа-излучение?

- А. Поток положительных ионов водорода.
- Б. Поток быстрых двухзарядных ионов гелия.
- В. Поток быстрых электронов.
- Г. Поток квантов электромагнитного излучения высокой энергии.
- Д. Поток нейтральных частиц.

5. Что такое бета-излучение?

- А. Поток положительных ионов водорода.
- Б. Поток быстрых двухзарядных ионов гелия.
- В. Поток быстрых электронов.
- Г. Поток квантов электромагнитного излучения высокой энергии.
- Д. Поток нейтральных частиц.

6. Что такое гамма-излучение?

- А. Поток положительных ионов водорода.
- Б. Поток быстрых двухзарядных ионов гелия.
- В. Поток быстрых электронов.
- Г. Поток квантов электромагнитного излучения высокой энергии.
- Д. Поток нейтральных частиц.

7. Сколько распадов в минуту происходит в радиоактивном источнике активностью 60 Бк?

- А. 60.
- Б. 3600.
- В. 1.
- Г. 360.
- Д. 6000.

8. Сколько распадов в секунду происходит в радиоактивном источнике активностью 1 мкКи?

- А. 37.
- Б.  $3,7 \cdot 10^4$ .
- В.  $3,7 \cdot 10^7$ .
- Г.  $3,7 \cdot 10^{13}$ .
- Д.  $3,7 \cdot 10^{16}$ .

9. Какой прибор позволяет наблюдать следы заряженных частиц в виде полосы из капель воды в газе?

- А. Фотопластинка.
- Б. Сцинтилляционный источник.
- В. Счетчик Гейгера-Мюллера.
- Г. Камера Вильсона.
- Д. Электронный микроскоп.

10. Какой прибор при прохождении через него ионизирующей частицы выдает сигнал в виде кратковременного импульса электрического тока?

- А. Счетчик Гейгера-Мюллера.  
 Б. Камера Вильсона.  
 В. Фотоэлемент.  
 Г. Осциллограф.  
 Д. Динамик.

### *Самостоятельная работа*

#### **Самостоятельная работа №2 (уровень Б)**

1. В  $1 \text{ м}^3$  комнатного воздуха содержится  $2 \cdot 10^8$  атомов радиоактивного элемента радона. Период полураспада радона 3,82 суток. Сколько примерно атомов радона из этого количества испытывает радиоактивный распад за 7,64 суток?
2. По условию задачи 1 определите активность радона в воздухе комнаты объемом  $50 \text{ м}^3$  в начальный момент времени и через 7,64 суток.
3. Один грамм урана обладает активностью  $1,24 \cdot 10^4$  Бк. Определите период полураспада урана.
4. Имеется 8 атомов радиоактивного вещества с периодом полураспада 5 секунд. Представьте приблизительно графиком зависимость числа  $N$  нераспавшихся атомов от времени  $t$ .

*Для тех,  
кому стало интересно*

#### **Как делаются научные открытия**

##### **Открытие радиоактивности**

*Два пути от гипотезы к открытию*

Всякое открытие есть находка. Чтобы чего-то найти, нужно искать. Но как искать нечто никому неизвестное и неизвестно где находящееся?

Первый помощник на этом пути – гипотеза, предположение о существовании какого-то физического явления или связи между какими-то явлениями. При этом возможны различные результаты. Гипотеза может оказаться правильной и получить экспериментальное подтверждение. Гипотеза может оказаться неправильной и открытие не состоится. И, наконец, гипотеза может оказаться неправильной, но в процессе ее проверки будет обнаружено новое явление и сделано неожиданное открытие.

Открытие радиоактивности Анри Беккерелем произошло как раз по последнему из возможных вариантов. Беккерель заинтересовался новым физическим явлением, открытым Рентгеном – возникновением проникающего излучения в газоразрядных трубках.

Было известно, что рентгеновские лучи излучаются из того места газоразрядной трубки, в котором наблюдается свечение стекла. Это свечение, называемое фосфоресценцией, вызывалось действием катодных лучей.

В беседе с Беккерелем его коллега Анри Пуанкаре высказал предположение, что рентгеновские лучи возможно возникают в процессе фосфоресценции стекла.

Если это предположение верно, то рентгеновское излучение должно наблюдаться и в случае фосфоресценции, вызванной другими причинами. Беккерель знал, что соли урана обладают способностью фосфоресцировать – светиться некоторое время после облучения солнечным светом. Он решил проверить, излучают ли урановые соли в процессе фосфоресценции и проникающее излучение, способное проходить сквозь черную бумагу и засвечивать фотопластинку.

Для этого он в темной комнате обернул фотопластинку двойным слоем черной бумаги, поверх бумаги насыпал урановую соль и выставил завернутую пластинку с солью на яркий солнечный свет. Через четыре часа он проявил пластинку и обнаружил на ней потемнение против тех мест, где находилась урановая соль. Он повторил опыт несколько раз и получил те же самые результаты.

По-видимому подтверждалось предположение о том, что фосфоресценция сопровождается испусканием рентгеновских лучей. Об этом открытии

Беккерель сделал предварительное сообщение 24 февраля 1896 года на заседании Академии наук. Но уже через пять дней он сделал новое открытие, опровергавшее проверяемую гипотезу.

Четыре дня были пасмурными и не было возможности облучить соли урана солнечным светом. Приготовленная для опыта фотопластинка вместе с солями урана пролежала все это время в темном ящике стола. 1 марта 1896 года был солнечный день. Беккерель хотел вынести приготовленную фотопластинку на солнечный свет, но вдруг почему-то передумал и решил ее проявить без освещения солей. Как объяснял позднее Беккерель, такой контрольный опыт был у него запланирован на будущее, но он решил воспользоваться этим случаем сейчас. И не пожалел о своем решении: на пластинке обнаружились темные пятна против мест расположения урановой соли. Первоначальная гипотеза была опровергнута. Обнаруженное им проникающее излучение не было связано ни с рентгеновскими лучами, ни с фосфоресценцией. Было открыто совершенно новое физическое явление.

Беккерель обнаружил, что любые соединения урана являются источником нового вида проникающего излучения, но больше всего излучает чистый уран. Следовательно источником невидимого излучения являются атомы последнего химического элемента таблицы Менделеева — урана.

Следующий шаг в раскрытии загадки радиоактивности был сделан Марией Склодовской-Кюри и Пьером Кюри. Их исследования также начинались с выдвижения гипотезы. Они предположили, что открытое Беккерелем явление самопроизвольного испускания невидимого излучения может быть присуще не только атомам урана, но и других химических элементов. Для проверки этой гипотезы нужно было проверить все известные химические элементы на способность испускать проникающее невидимое излучение. Для регистрации излучения Мария Кюри использовала электроскоп, изготовленный Пьером Кюри. Если на пластину заряженного электроскопа помещалось какое-либо химическое соединение урана, электроскоп постепенно разряжался, так как под действием «урановых лу-

чей» происходила ионизация воздуха и ионы нейтрализовали заряд электроскопа. В сотнях опытов со всеми другими химическими элементами и их соединениями, выполненных Марией Кюри, электроскоп не разряжался. Так продолжалось до опытов с торием.

Торий и его соединения разряжали электроскоп. Гипотеза о существовании других химических элементов, обладающих способностью испускать невидимые проникающие лучи, получила первое подтверждение.

Но Мария Кюри не прекратила на этом свои исследования. Когда были испытаны все известные химические элементы, она высказала новое предположение: может быть есть в природе еще неизвестные химические элементы, которые обладают свойствами, подобными свойствам урана и тория.

Но как можно проверить эту гипотезу, если сами эти элементы еще не открыты? Мария Кюри решила искать их в природных минералах по способности разряжать электроскоп. Исследованы были сотни минералов из различных коллекций, но если некоторые из них обнаруживали способность разряжать электроскоп, химический анализ обнаруживал в этих минералах соединения урана или тория. Но вот наконец пришел долгожданный успех: в июле 1898 года были обнаружены два минерала, хальколит и смоляная руда, которые разряжали электроскоп быстрее, чем чистый уран. Теперь нужно было выделить из этих минералов неизвестный активный химический элемент, если он существует. Мария и Пьер Кюри выделили новый элемент и назвали его полонием в честь родины Марии Кюри — Польши. Затем был выделен еще один новый химический элемент. Кюри назвали его радием (от латинского слова *radius* — луч). Радий испускал невидимые излучения примерно в 900 раз интенсивнее урана. Мария Кюри ввела в науку термин «радиоактивность» для обозначения нового физического явления, открытого Беккерелем.

Открытия Марии и Пьера Кюри могут служить примером того, как смелая научная гипотеза в сочетании с настойчивыми планомерными исследованиями могут привести к важным открытиям.



### Изучив эту тему,

- ♦ вы узнаете, как устроен атом;
- ♦ поймете, чем отличаются законы квантовой физики от законов классической физики;
- ♦ научитесь наблюдать линейчатые оптические спектры

### Основные понятия:

Модель атома Томсона ♦ Опыт по рассеянию альфа-частиц ♦ Атомное ядро ♦ Планетарная модель атома ♦ Линейчатый спектр излучения ♦ Линейчатый спектр поглощения ♦ Квантовые постулаты Бора ♦ Энергетические диаграммы ♦ Опыт Франка и Герца ♦ Неупругие столкновения ♦ Дифракция электронов ♦ Соотношение неопределенностей ♦ Волновая функция ♦ Главное квантовое число ♦ Орбитальное квантовое число ♦ Магнитное квантовое число ♦ Спин электрона ♦ Принцип Паули ♦ Электронная оболочка ♦ Вынужденное или индуцированное излучение ♦ Лазер ♦ Метастабильное состояние ♦ Гелий-неоновый лазер

*Конспект.  
Таблицы. Схемы*

### Планетарная модель атома. Модель атома Томсона (уровень А)

Открытие существования электронов, входящих в состав любых атомов, положило начало изучению строения атомов.

Первую модель строения атома как системы, состоящей из положительных и отрицательных элек-

трических зарядов, предложил в 1903 году Дж. Дж. Томсон. Он высказал гипотезу о том, что положительный электрический заряд равномерно распределен по всему объему атома в шаре радиусом примерно  $10^{-10}$  м, а электроны, имеющие значительно меньшие размеры, располагаются внутри этого шара из положительного заряда (рис. 25)

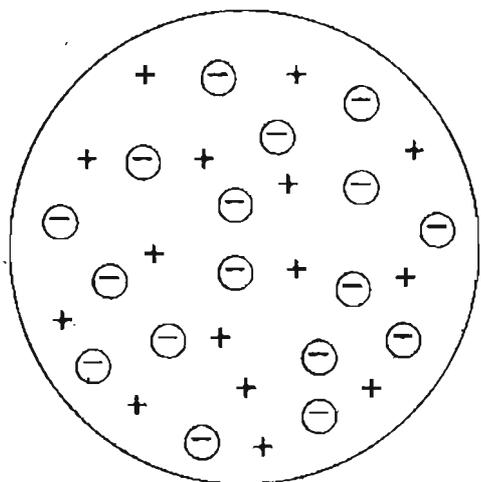


Рис. 25.

### Опыты по рассеянию альфа-частиц

Другую модель атома разработал Э. Резерфорд. Его сотрудники Х. Гейгер и Э. Марсден ставили на пути узкого пучка альфа-частиц тонкие листки золотой фольги и наблюдали за тем, как рассеиваются альфа-частицы после прохождения через эту преграду.

Опыты показали, что через металлическую фольгу, содержащую несколько тысяч слоев атомов, большинство альфа-частиц проходит почти не изменяя направления движения, с углом отклонения не более чем на  $1^\circ - 2^\circ$ . Однако небольшая доля альфа-частиц испытывала рассеяние на значительно большие углы, а некоторые частицы (примерно одна на 8000), даже рассеивались в направлении, обратном направлению первоначального движения (рис. 26).

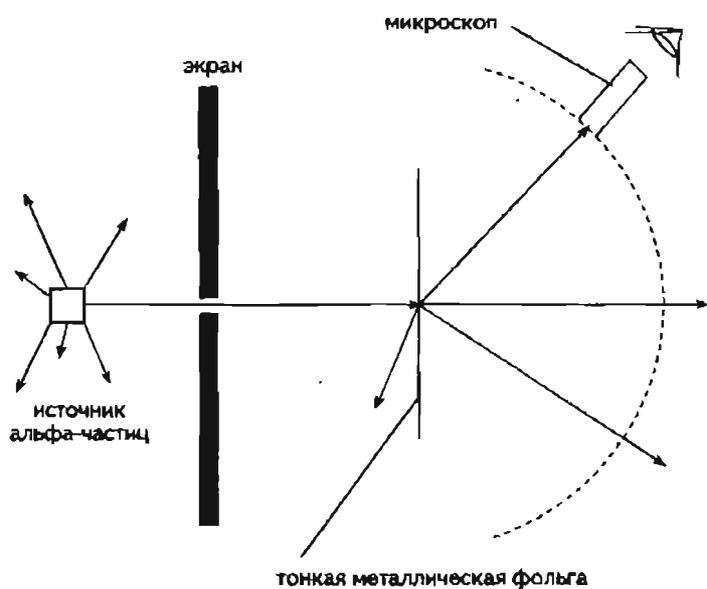


Рис. 26

Проанализировав результаты опытов по рассеянию альфа-частиц в веществе, Резерфорд в 1909 году пришел к выводу, что большая часть объема атомов пуста, а весь положительный заряд и почти вся масса атома сосредоточены в шаре радиусом  $10^{-15}$  м, расположенном в центре атома. Эту положительно заряженную часть атома он назвал **атомным ядром**. Отрицательно заряженные электроны по представлению Резерфорда под действием сил кулоновского притяжения обращаются вокруг положительно заряженных ядер подобно тому, как планеты обращаются под действием гравитационных сил вокруг Солнца (рис. 27).

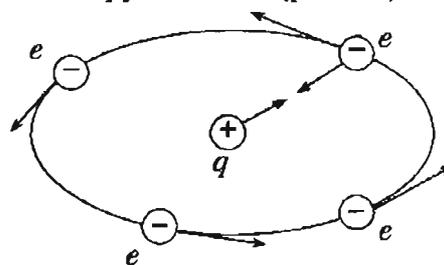


Рис. 27

Модель атома Резерфорда называют **планетарной моделью** или **ядерной моделью атома**.

Ядерная модель атома объяснила результаты опытов по рассеянию альфа-частиц в веществе, но встретилась с принципиальной трудностью: согласно законам электродинамики ускоренное движение электрических зарядов обязательно сопровождается излучением электромагнитных волн, а излучаемые электромагнитные волны должны уносить часть энергии электрона. Поэтому скорость движения электрона должна постепенно уменьшаться, а это должно приводить к уменьшению радиуса его орбиты. Двигаясь по спирали, электрон должен упасть на ядро (рис. 28), но на самом деле этого не происходит.

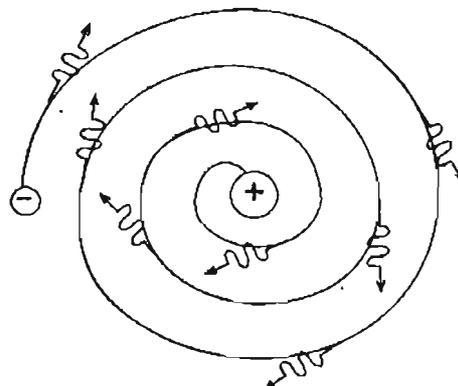


Рис. 28

### Линейчатые атомные спектры и квантовые постулаты Бора (уровень А)

На существование у атомов сложной внутренней структуры, различной для атомов разных химических элементов, указывал факт существования линейчатых спектров излучения и поглощения.

Любое вещество в газообразном состоянии при нагревании до высокой температуры излучает свет. При разложении этого света с помощью призмы или дифракционной решетки наблюдается не сплошной спектр с постепенными переходами от одного цвета к другому, а набор отдельных цветных линий, называемый **линейчатым спектром излучения**.

*Каждый химический элемент обладает собственным, только ему присущим линейчатым спектром излучения.*

При пропускании белого света со сплошным спектром излучения через газ в сплошном спектре возникают темные линии именно в тех местах, в которых от этого газа в нагретом состоянии наблюдаются светлые линии спектра излучения. Набор темных линий в сплошном спектре излучения называют **линейчатым спектром поглощения вещества**.

Каждой линии излучения соответствует определенная длина световой волны  $\lambda$  или частота  $\nu$ . Существование линейчатых спектров излучения и поглощения, особенных для каждого химического элемента, показывает, что атомы всех химических элементов обладают способностью излучать и поглощать фотоны лишь с определенными частотами.

Свет как электромагнитная волна с частотой  $\nu$  может излучаться при гармонических колебаниях электрического заряда с частотой  $\nu$ .

Какие же заряды колеблются внутри атомов, и почему эти колебания возможны только с определенными частотами, разными для атомов различных элементов?

Открытие электронов в составе атомов давало предположительный ответ на вопрос, какие заряды могут колебаться внутри атомов — внутри атомов при излучении и поглощении электромагнитных волн могут совершать колебания электроны. Однако для полного объяснения линейчатых спектров атомов нужна была такая модель строения атома, на основе которой можно было бы вычислить длины волн линейчатого спектра любого химического элемента.

В 1913 году датский физик Нильс Бор высказал новую гипотезу о свойствах атомов в виде двух **квантовых постулатов**.

Первый квантовый постулат утверждает, что *атомная система не излучая энергии может находиться только в особых стационарных квантовых состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия  $E_n$* .

Второй постулат утверждает, что *любое испускание или поглощение энергии происходит только при переходах атома из одного стационарного квантового состояния в другое*.

При переходе атома из стационарного состояния с энергией  $E_n$  в стационарное состояние с энергией  $E_m$  излучается или поглощается квант электромагнитного излучения с энергией  $h\nu$ , равной разности энергий атома в двух квантовых состояниях:

$$h\nu = E_n - E_m \quad (3.1),$$

где  $h$  — постоянная Планка;  $\nu$  — частота.

Для наглядного представления возможных квантовых состояний атомов применяются **энергетические диаграммы**. На энергетической диаграмме каждое стационарное состояние атома изображается горизонтальной линией. Первая линия изображает основное состояние атома, остальные соответствуют возбужденным состояниям. Расстояние от каждой линии, изображающей возбужденное состояние, до линии основного состояния пропорционально разности энергий возбужденного  $E_n$  и основного  $E_1$  состояний (рис. 29).

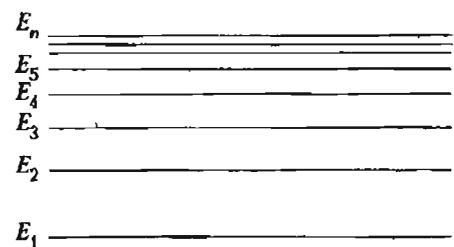


Рис. 29

Переход атома из одного стационарного состояния в другое изображается вертикальными стрелками. Например, переход из одного возбужденного состояния с энергией  $E_4$  в другое возбужденное состояние с энергией  $E_2$  с испусканием кванта электромагнитного излучения изображается стрелкой, направленной вниз (рис. 30)

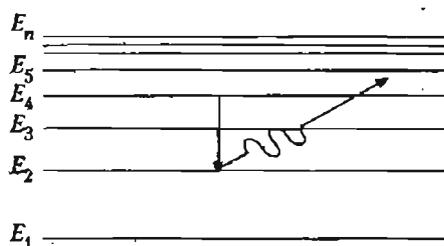


Рис. 30.

Переход из основного состояния с энергией  $E_1$  в возбужденное состояние  $E_3$  с поглощением кванта электромагнитного излучения обозначается стрелкой, направленной вверх (рис. 31).

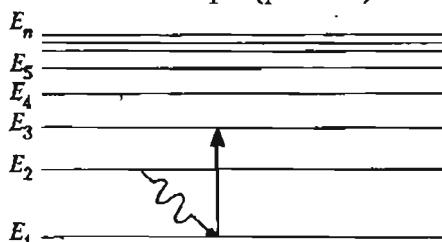


Рис. 31

Происхождение линейчатых спектров атомов химических элементов объясняется переходами атомов из возбужденных состояний в основное с испусканием квантов света. Различия линейчатых спектров должны найти объяснение в различиях стационарных состояний атомов разных химических элементов.

### Лабораторная работа

#### Наблюдение линейчатых спектров (уровень А)

**Цель работы.** Знакомство с методами наблюдения сплошных и линейчатых спектров излучения.

**Оборудование.** Спектроскоп, стеклянная призма, дифракционная решетка или лазерный диск, лампа накаливания, люминесцентная лампа.

**Задание.** Используя стеклянную призму или дифракционную решетку, пронаблюдайте сплошной спектр излучения от лампы накаливания и линейчатый спектр излучения от люминесцентной лампы.

**Содержание работы.**

Для наблюдения сплошного спектра излучения нужно включить электрическую лампу с прямой

нитью накала и посмотреть на нить лампы сквозь дифракционную решетку, располагая щели решетки параллельно нити лампы (см. рис. 32).

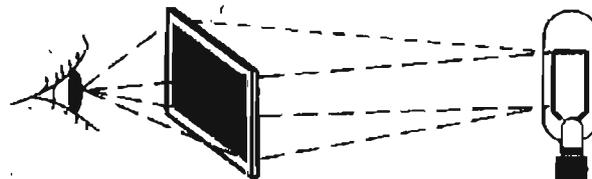


Рис. 32

При отсутствии специальной лампы можно воспользоваться обычной лампой для карманного фонаря. При наблюдении нити лампы сквозь дифракционную решетку слева и справа от нити видны разноцветные полосы сплошного спектра излучения.

Для наблюдения линейчатых спектров различных химических элементов в школьном кабинете физики можно использовать спектральные трубки, заполненные различными газами.

При отсутствии спектральных трубок и прибора для их зажигания линейчатый спектр излучения можно наблюдать от обычной люминесцентной лампы. Для этого можно просто посмотреть на люминесцентную лампу сквозь дифракционную решетку, располагая щели решетки параллельно трубке лампы. В зависимости от типа лампы при этом будут видны либо несколько цветных полос, либо более яркие цветные полосы линейчатого спектра на фоне сплошного спектра. Линейчатый спектр люминесцентной лампы можно наблюдать и через трехгранную стеклянную призму, приблизив ее к глазу и расположив ее ребро параллельно трубке. Смотреть нужно у самого края призмы, медленно вращая ее для нахождения нужного угла наблюдения.

Конспект.

Таблицы. Схемы

#### Экспериментальное обоснование теории Бора (уровень Б)

Формулировка квантовых постулатов стала еще одним важным шагом на пути создания квантовой физики. В гипотезе Планка о существовании квантов электромагнитного излучения не содержалось явной связи между квантами и свойствами атомов. Гипотеза Бора о квантовых состояниях атомов раз-

вивала идею Планка и указывала причину возникновения квантов. Согласно представлениям Бора в мире атомов действуют совершенно иные законы, чем в привычном нам мире больших тел.

Хорошо известно, например, что система Земля — искусственный спутник Земли может изменять свою энергию непрерывно. Энергия этой системы может принимать любые значения, спутник может двигаться по орбите любого радиуса — нужно лишь сообщить ему необходимую энергию.

В мире атомов иные законы. Атом не может принять произвольную порцию энергии при взаимодействии с другим атомом. Он может изменять свою внутреннюю энергию лишь определенными порциями — квантами. Для движения электрона существуют лишь строго определенные разрешенные орбиты. Так что атом с его диаграммой возможных стационарных энергетических состояний скорее напоминает не планетную систему с электронами, обращающимися вокруг ядра, а многоэтажный дом, в котором нет лестниц.

«Жильцы» этого дома, электроны, перемещаются с этажа на этаж прыжками и могут обитать только на одном из этажей, но никак не в промежутках между ними. Этот «дом для электронов» довольно необычен, так как расстояния между этажами уменьшаются по мере подъема вверх, а поднявшись на любой верхний этаж, электрон может «пожить» там лишь миллиардные доли секунды, а затем спускается вниз, расплачиваясь за подъем испусканием кванта света (рис. 33).

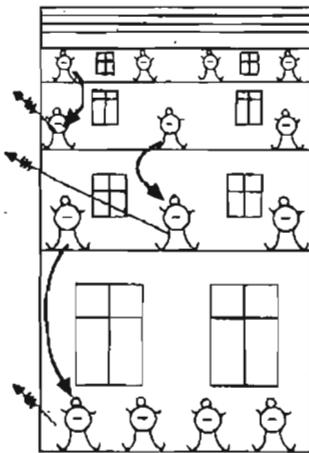


Рис. 33

### Опыт Франка и Герца

Гипотеза Бора о квантованности энергетических состояний атомов получила экспериментальное подтверждение в 1913 году в опыте немецких физиков Джеймса Франка и Густава Герца.

В этом опыте исследовались столкновения электронов с атомами ртути. Пары ртути находились в стеклянной трубке. По оси трубки был расположен катод К. Катод окружала цилиндрическая сетка С, за которой располагался цилиндрический собирающий электрод — коллектор А. Катод К был соединен с отрицательным полюсом источника постоянного тока, а сетка С — с положительным полюсом.

При нагревании катода испускаемые им электроны двигались от катода К к сетке С и далее к собирающему коллектору А. Между собирающим электродом А и сеткой С прикладывалось напряжение 0,5 В, создающее электрическое поле, направленное противоположно электрическому полю между катодом и сеткой. Это поле не могло остановить быстро движущиеся электроны (рис. 34), но электроны с кинетической энергией меньше 0,5 эВ не пропускались к собирающему электроду и возвращались к сетке (рис. 35).

Результаты исследования зависимости силы тока в цепи сетка—собирающий электрод от напряжения между катодом и сеткой представлены графиком на рисунке 36.

Этот график показывает, что при увеличении напряжения между катодом и сеткой от 0 В до 4,9 В сила тока непрерывно возрастала. При достижении значения напряжения 4,9 В сила тока начинала убывать. При дальнейшем увеличении напряжения между катодом и сеткой сила тока сначала уменьшалась до некоторого минимального значения, затем вновь возрастала до достижения второго максимума при напряжении 9,8 В, далее вновь следовало убывание и так далее картина повторялась. Убывание силы тока в цепи собирающего электрода при достижении электронами значения энергии 4,9 эВ можно объяснить тем, что начиная с этого значения часть электронов теряла почти всю свою кинетическую энергию где-то на пути от катода к сетке и их кинетическая энергия в пространстве между сеткой и собирающим электродом оказывалась меньше 0,5 эВ.

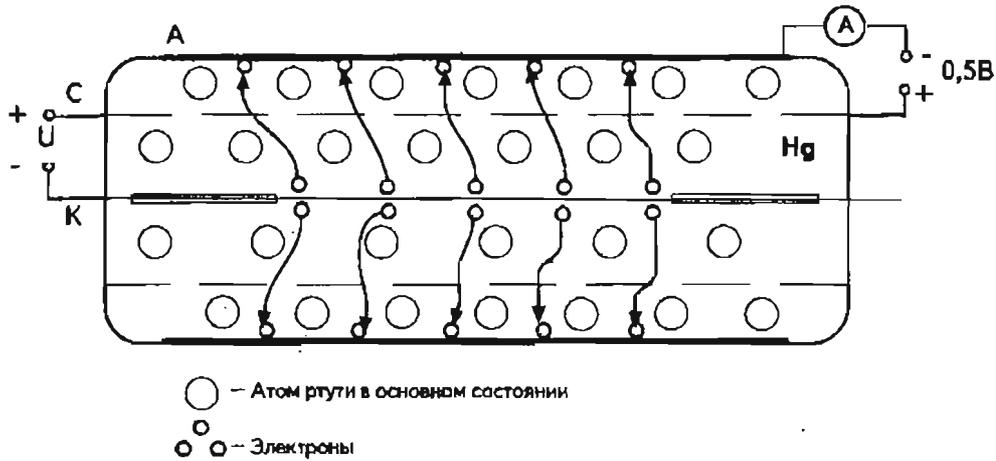


Рис. 34

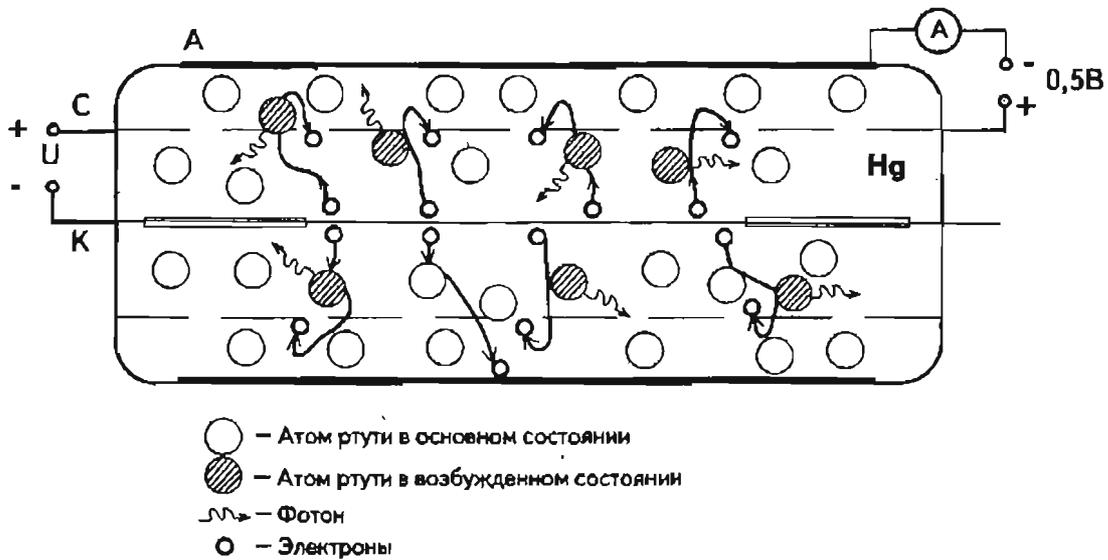


Рис. 35

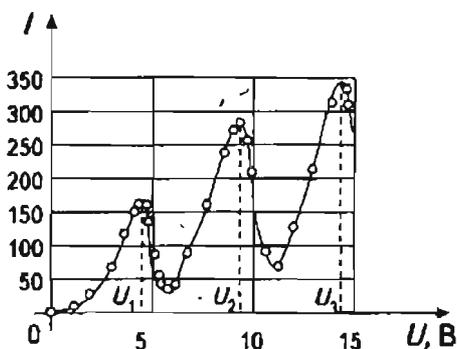


Рис. 36

в результате которых часть кинетической энергии частиц превращается во внутреннюю энергию частиц, называются **неупругими столкновениями**.

Из опыта Франка и Герца следовало, что неупругие столкновения электронов с атомами ртути оказываются возможными только при достижении значения энергии 4,9 эВ. Второй максимум на графике соответствует удвоенному значению той же энергии. Электрон с такой энергией мог перевести в возбужденное состояние два атома ртути.

Эксперимент подтвердил существование квантовых стационарных энергетических состояний у атомов и неспособность атомов плавно изменять свою внутреннюю энергию.

Потерять свою энергию электроны могли при столкновениях с атомами ртути. Столкновения, в ре-

Из опытов Франка и Герца следовало, что разность энергий между основным и первым возбужденным состояниями атома ртути составляет 4,9 эВ. Согласно представлениям Бора, возбужденные атомы ртути должны при самопроизвольных переходах из возбужденного состояния в нормальное испускать фотоны с энергией:

$$h\nu = E_2 - E_1 = 4,9 \text{ эВ.}$$

Частота  $\nu$  ожидаемого излучения равна:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} = \frac{4,9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1}} = 1,2 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$$

Опыты подтвердили, что до напряжения 4,9 В между катодом и сеткой трубка не излучает света, а при достижении напряжения 4,9 В ртутные пары в трубке излучают ультрафиолетовый свет с частотой  $1,2 \cdot 10^{15}$  Гц.

Гипотеза Бора о существовании стационарных квантовых состояний атомов и квантовом характере поглощения и излучения энергии атомами после экспериментального подтверждения становится теорией Бора.

### Спектр атома водорода (уровень Б)

Большим успехом теории Бора был теоретический расчет линейчатого спектра водорода.

Экспериментальное изучение спектра водорода показало, что частоты всех наблюдаемых спектральных линий можно вычислить по формуле:

$$\nu = 3,29 \cdot 10^{15} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ с}^{-1} \quad (3.2)$$

где  $m$  и  $n$  — целые числа,  $n$  всегда больше  $m$ .

При значении  $m = 1$  и различных значениях  $n$ , начиная с  $n = 2$ , получаются частоты серии спектральных линий, называемых серией Лаймана. Эти линии лежат в ультрафиолетовой области. При  $m = 2$  получается серия Бальмера, линии которой находятся в области видимого излучения. При  $m > 2$  получаются серии, лежащие в инфракрасной области спектра. Почему частоты спектральных линий определяются именно такой формулой, было совершенно непонятно.

Объяснение спектру водорода смогла дать теория Бора. Это объяснение оказалось возможным после добавления к двум квантовым постулатам условия о минимальном возможном значении изменения орбитального момента импульса электрона.

Орбитальным моментом импульса электрона при движении по круговой орбите радиусом  $r$  со скоростью  $v$  называется произведение  $m_e \cdot v \cdot r$ , где  $m_e$  — масса электрона. Согласно теории Бора, момент количества движения электрона в атоме, как и внутренняя энергия атома, не может изменяться непрерывно. Существует минимальное значение возможного изменения момента импульса электрона в атоме, минимальная ступень изменения, равная постоянной Планка, деленной на  $2\pi$ .

Электрон в атоме может обладать только одним из дискретного ряда значений орбитального момента импульса:

$$m_e \cdot v \cdot r_n = n \cdot \frac{h}{2\pi} \quad (3.3)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$

При круговом движении электрона вокруг ядра каждому квантовому значению орбитального момента импульса электрона соответствует определенное значение радиуса электронной орбиты. Возможные значения радиусов круговых орбит можно найти следующим образом.

В атоме водорода заряд ядра равен заряду электрона  $e$ . Сила  $F_3$  кулоновского взаимодействия электрона с ядром водорода на расстоянии  $r$  равна:

$$F_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e \cdot e}{r^2} \quad (3.4)$$

Центростремительное ускорение электрона под действием этой силы при движении по окружности радиуса  $r$  равно

$$a = \frac{F_3}{m_e} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{m_e r^2} = \frac{v^2}{r},$$

где  $v$  — скорость движения электрона по круговой орбите.

Отсюда следует:

$$v^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e r} \quad (3.5)$$

Используя уравнения (3.3) и (3.5) можно получить формулу для вычисления радиусов разрешенных круговых орбит в атоме водорода:

$$r_n = \frac{h^2 \cdot n^2 \cdot \epsilon_0}{m_e \cdot e^2 \cdot \pi} \quad (3.6)$$

Подставляя в формулу (3.6) значения  $n = 1, 2, 3$  и так далее, можно вычислить радиусы разрешенных круговых орбит электронов в атоме водорода.

Для первой круговой орбиты,  $n = 1$ , получается значение:

$$r_1 = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ м.}$$

Для вычисления частот спектральных линий нужно найти значения энергии электрона на каждой разрешенной орбите.

Энергия электрона  $E$  складывается из кинетической энергии  $E_k$  и потенциальной энергии  $E_n$  кулоновского взаимодействия электрона с ядром:

$$E = E_k + E_n = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (3.7)$$

Значение потенциальной энергии электрона отрицательно, так как между электроном и ядром действуют силы притяжения.

Подставив выражение для  $v^2$  из уравнения (3.5) в уравнение (3.7) получим:

$$E = \frac{m_e \cdot e^2}{8\pi\epsilon_0 m_e r} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} \quad (3.8)$$

Подставив в уравнение (3.8) выражение (3.6) для разрешенных радиусов орбит, получим спектр возможных энергетических состояний атома водорода:

$$E_n = \frac{e^2 \cdot m_e \cdot e^2 \pi}{8\pi\epsilon_0 \cdot h^2 \cdot n^2 \epsilon_0} = -\frac{m_e \cdot e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2} \quad (3.9)$$

При переходе атома водорода из стационарного состояния  $n$  в стационарное состояние  $m$  происходит излучение кванта с энергией:

$$h\nu = E_n - E_m = \frac{m_e \cdot e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (3.10)$$

и с частотой:

$$\nu = \frac{m_e \cdot e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (3.11)$$

Мы получили выражение, совпадающее по форме с эмпирически найденной формулой (3.2) для водородного спектра. Остается вычислить значение постоянной перед скобкой. Подставив значения массы  $m_e$  электрона, его заряда  $e$ , электрической постоянной  $\epsilon_0$  и постоянной Планка  $h$ , получим:

$$\frac{m_e \cdot e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} = \frac{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг} (1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^4}{8(8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1})^2 (6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1})^3} \approx 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$$

Таким образом теория Бора дала способ теоретического расчета всех частот линейчатого спектра водорода. Возникновение различных серий спектральных линий поясняется диаграммой энергетических уровней на рисунке 37.

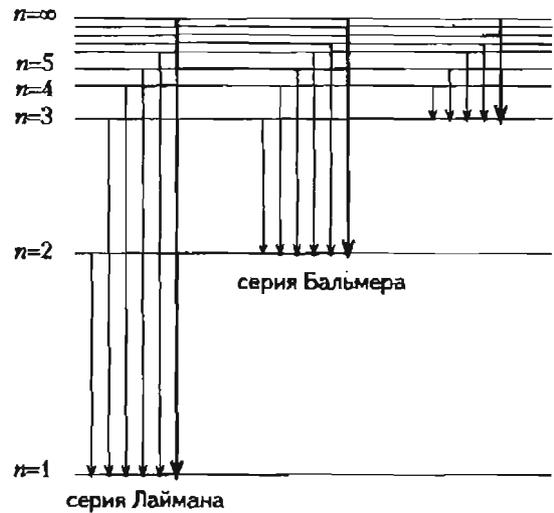


Рис. 37

Диаграмма показывает, что серия Лаймана возникает при переходах атомов водорода из различных возбужденных состояний в основное состояние. Серия Бальмера соответствует переходам атомов с возбужденных уровней выше первого на первый возбужденный уровень.

Происхождение различных спектральных серий по теории Бора можно пояснить и схемой переходов электронов между разрешенными круговыми орбитами (рис. 38).

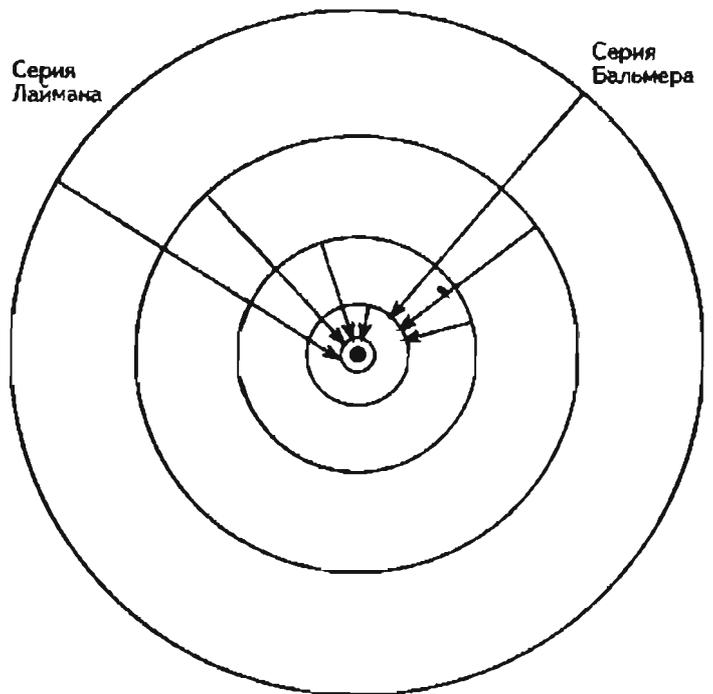


Рис. 38

*Лабораторная  
работа*

### Изучение спектра водорода (уровень Б)

**Цель работы.** Приобретение умения измерения длин волн линейчатых спектров излучения с помощью дифракционной решетки.

**Оборудование.** Дифракционная решетка, спектральная трубка с водородом, прибор для зажигания спектральных трубок.

**Задание.** Рассчитайте для водорода длины волн первых четырех линий бальмеровской серии. Измерьте длины волн линейчатого спектра водорода с помощью дифракционной решетки и сравните результаты расчета и эксперимента.

**Содержание работы.**

Для расчета длин волн четырех первых спектральных линий бальмеровской серии водорода нужно воспользоваться формулой (3.2), приняв значение  $m = 2$  и придавая  $n$  значения 3, 4, 5, 6.

Для получения спектра излучения водорода можно пропускать электрический ток через газ. При прохождении электрического тока через газ нейтральные атомы переходят в возбужденное состояние в результате столкновений с электронами, разгоняемыми электрическим полем.

Длину волны  $\lambda$  спектральной линии с помощью дифракционной решетки можно определить, поместив решетку напротив узкой щели в экране, за которым находится спектральная трубка (рис. 39).

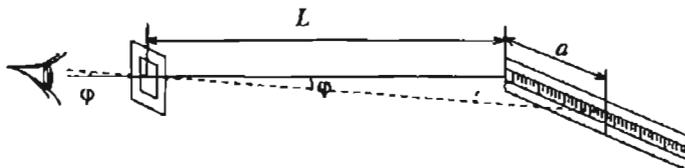


Рис. 39

При наблюдении света от щели глазом через дифракционную решетку слева и справа от белой полосы наблюдаются цветные полосы линейчатого спектра излучения газа.

Измерив расстояние  $L$  от решетки до щели и расстояние  $a$  от щели до спектральной линии можно определить длину волны  $\lambda$  этой спектральной линии, используя условие первого максимума дифракционной решетки:

$$d = \sin \varphi \cdot \lambda \quad (3.12)$$

В этом условии  $d$  – постоянная решетки,  $\varphi$  – угол между направлениями на щель в экране и на спектральную линию.

Из рисунка 6.39 следует, что

$$\sin \varphi = \frac{a}{\sqrt{L^2 + a^2}} \quad (3.13)$$

Постоянную решетки можно найти, зная число штрихов  $N$  на единицу длины:

$$d = \frac{1}{N} \quad (3.14)$$

**Порядок выполнения работы.**

1. Установите спектральную трубку с водородом в прибор для зажигания спектральной трубки. Укрепите в штативе дифракционную решетку напротив щели в экране. Измерьте расстояние  $L$  от решетки до щели. Перпендикулярно прямой, соединяющей решетку со щелью, укрепите метр, совместив его нулевую отметку со щелью.
2. Включите прибор для зажигания спектральной трубки. Наблюдайте через дифракционную решетку линейчатый спектр излучения газа. По шкале метра определите расстояние  $a$  от щели до 1-й, 2-й, 3-й и 4-й спектральной линии.
3. По измеренным значениям  $L$  и  $a$  вычислите значения синусов углов  $\sin \varphi$  для 1-й, 2-й, 3-й и 4-й спектральных линий. По известному значению числа штрихов  $N$  решетки на единицу длины и найденным значениям синусов углов вычислите постоянную решетки  $d$  и длины волн  $\lambda$  для 1-й, 2-й, 3-й и 4-й спектральных линий.

Результаты измерений и вычислений запишите в отчетную таблицу.

. Отчетная таблица

$L, \text{ м}$				
$d, \text{ м}$				
№	1	2	3	4
$a, \text{ м}$				
$\sin \varphi$				
$\lambda_{\text{эксп}}, \text{ м}$				
$\lambda_{\text{теор}}, \text{ м}$				

Конспект.

Таблицы. Схемы

**Волновые свойства частиц (уровень Б)**

Добившись успеха в объяснении спектра водорода и получив подтверждение квантовых постулатов в опыте Франка и Герца, теория атома Бора далее встретила с принципиальными затруднениями. На ее основе не удавалось объяснить спектры всех остальных химических элементов.

Причиной затруднений теории Бора была попытка соединения в ней новых квантовых принципов, постулирующих дискретность изменения энергии и момента импульса атомных систем, с классическими представлениями о движении частиц в атоме по определенным орбитам в соответствии с законами классической механики.

Дальнейшие исследования явлений микромира показали, что к электронам и атомам неприменимы представления классической механики о движении частиц по определенным траекториям с определенным значением скорости в каждой точке траектории.

Полная непригодность классических представлений для описания движения микрочастиц стала очевидной после открытия явления дифракции электронов.

Основываясь на том факте, что свет одновременно проявляет свойства частиц и свойства волн французский физик Луи де Бройль в 1924 году предположил, что любая частица обладает некоторой длиной волны.

Согласно гипотезе де Бройля длина волны  $\lambda$  тела массой  $m$ , движущегося со скоростью  $v$ , определяется такой же формулой, как и для фотонов.

Импульс  $p$  фотона равен энергии  $h\nu$  фотона, деленной на скорость света  $c$ :

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (3.15)$$

Отсюда длина волны  $\lambda$  фотона равна частному от деления постоянной Планка  $h$  на импульс  $p$  фотона:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (3.16)$$

Для частиц соответственно:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad (3.17)$$

Гипотеза де Бройля получила экспериментальное подтверждение в 1927 г. в опытах К. Девиссона и Л. Джермера и в независимых опытах Дж. Томсона. В опытах Девиссона и Джермера на поверхность кристалла направлялся пучок электронов и измерялась интенсивность отраженного пучка при различных углах отражения. В их приборе (рис. 40) испускаемые нагретой нитью  $F$  электроны ускорялись электрическим полем и фокусировались электродом  $G$  на мишень  $T$ . Отраженные от мишени электроны попадали в коллектор  $C$ , связанный с прибором, измеряющим ток. Коллектор мог перемещаться относительно мишени и измерять интенсивность пучка электронов при отражении под различными углами.

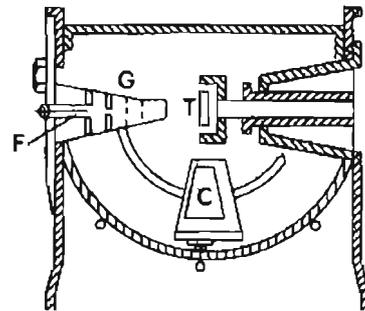


Рис. 40

Оказалось, что с изменением угла отражения в отраженном пучке обнаруживаются максимумы и минимумы (рис. 41). Положение максимумов совпадало с результатами расчетов, в которых кристалл рассматривался как дифракционная решетка из атомов, на которой происходит дифракция электронов с длиной волны, вычисленной по формуле (3.17) де Бройля.

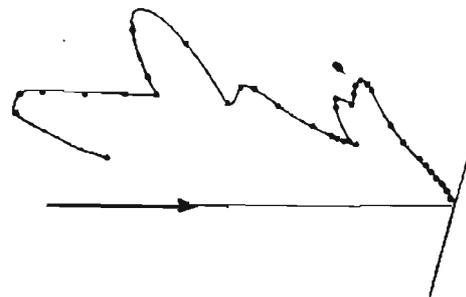


Рис. 41

Дифракция и интерференция электронов обнаруживаются и при прохождении пучка электронов через щель в экране. Дифракционная картина состоит из яркой расширенной по сравнению со щелью центральной полосы и чередующихся темных

и светлых полос, как при наблюдении дифракции света от щели (рис. 42).

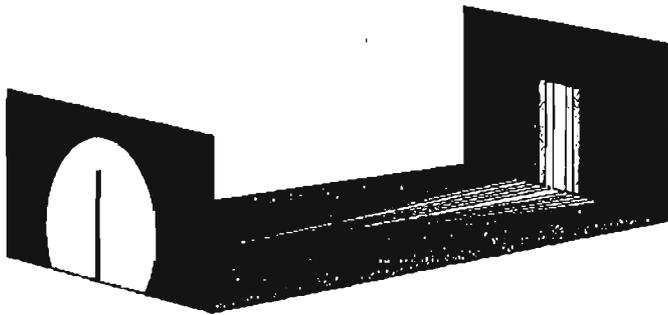


Рис. 42

При образовании максимумов и минимумов электроны не исчезают и не делятся на части. В каждую точку пространства электрон попадает как неизменная частица с элементарным электрическим зарядом, дифракционные максимумы и минимумы соответствуют максимальным и минимальным значениям числа попадающих в эти области электронов.

Принципиально новое объяснение явлению дифракции электронов и любых других микрочастиц предложил в 1927 году немецкий физик Вернер Гейзенберг.

Опыт показывает, что после прохождения электронов через щель шириной  $d$  на фотопленке за щелью наблюдается широкая темная полоса против щели и затем чередующиеся слабые темные и светлые симметричные полосы.

Максимальный угол  $\varphi$  отклонения электронов в пределах центрального максимума удовлетворяет условию первого дифракционного минимума для дебройлевской волны  $\lambda$  электрона:

$$d \cdot \sin \varphi = \lambda = \frac{h}{p} \tag{3.18}$$

Изменение направления движения электрона показывает, что в результате его взаимодействия с краями отверстия в экране изменяется составляющая  $\vec{p}_x$  импульса, перпендикулярная вектору первоначального импульса  $\vec{p}$ . Изменение  $\Delta \vec{p}_x$  вектора импульса электрона можно найти по углу  $\varphi$  его отклонения (рис. 43).

$$\Delta p_x = p \cdot \sin \varphi \tag{3.19}$$

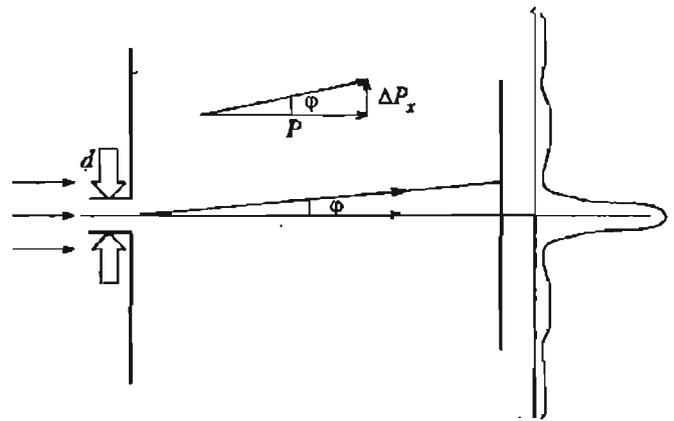


Рис. 43

Из выражений (3.18) и (3.19) следует:

$$\Delta p_x = p \cdot \frac{h}{p \cdot d} = \frac{h}{d}, \tag{3.20}$$

$$\Delta p_x \cdot d = h$$

Последний результат можно истолковать следующим образом. Если электрон двигался в направлении экрана с точно определенным импульсом  $p$  и экран был поставлен для определения координаты  $x$  электрона в плоскости экрана, то определив координату  $x$  с неопределенностью  $\Delta x$ , равной ширине щели,  $\Delta x = d$ , мы уже не знаем точного значения импульса, так как составляющая  $p_x$  импульса имеет неопределенность порядка  $\Delta p_x$ .

Произведение неопределенности  $\Delta x$  координаты частицы на неопределенность  $\Delta p_x$  импульса примерно равна постоянной Планка:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx h \tag{3.21}$$

Из соотношения (3.21) следует, что одновременное точное определение координаты и импульса частицы невозможно. Чем точнее мы будем определять импульс частицы ( $\Delta p_x \rightarrow 0$ ), тем менее точно будем знать ее координату ( $\Delta x \rightarrow 0$ ). При все более точном определении координаты частицы все менее точными будут сведения о ее импульсе. Соотношение (3.21) называют соотношением неопределенностей.

Более точная математическая форма выражения соотношения неопределенностей имеет вид:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{2\pi} \tag{3.22}$$

Соотношению неопределенностей можно придать и другой вид, выразив неопределенность импульса  $\Delta p_x$  через неопределенность энергии  $\Delta E$  и неопределенность координаты  $\Delta x$  через неопределенность времени  $\Delta t$ . Для фотона справедливо:

$$\Delta p_x = \frac{\Delta E}{c} \quad (3.23)$$

$$\Delta x = c\Delta t \quad (3.24)$$

Из выражений (3.23), (3.24) и (3.22) следует:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{2\pi} \quad (3.25)$$

Как показали многочисленные эксперименты, введенное для фотонов соотношение (3.25) оказывается справедливым для любых частиц и систем. Смысл соотношения неопределенностей в форме (3.25) заключается в том, что значение энергии любой системы не может быть определено точно в определенный момент времени  $t$ . Неопределенность  $\Delta E$  значения энергии и момента времени  $\Delta t$  пребывания системы в состоянии с энергией  $E$  связаны соотношением неопределенностей (3.25).

Создание квантовой механики на основе принципиально новых представлений о физической природе элементарных частиц и атомов началось с открытий математического метода, способного давать правильные результаты при описании состояний любых атомных систем. В этом методе используется особая волновая функция  $\Psi$  (пси-функция). При решении задачи о движении частицы в квантовой механике решается задача отыскания квадрата модуля волновой функции  $|\Psi|^2$  в разных точках пространства. Квадрат модуля волновой функции, вычисленный для некоторой точки пространства, пропорционален вероятности нахождения частицы в данной точке. Таким образом, квантовая механика дает вероятностное описание состояния атомных систем, но не определяет координаты и скорости частиц в любой момент времени, как это делается в классической механике. Вопросы об «истинной» траектории электрона, об его «истинной» скорости в данной точке бессмысленны. Мир оказался устроен не так, как это представлялось в классической физике.

### Электронные оболочки атома (уровень Б)

Описание стационарных состояний атомных систем в квантовой механике дается на основе исполь-

зования уравнения, полученного в 1926 году австрийским физиком Эрвином Шредингером.

Согласно этому уравнению энергия, импульс и момент импульса свободной частицы могут изменяться непрерывным образом, на любую величину.

Если же движение частицы в результате взаимодействия с другими частицами ограничено в пространстве, то ее энергия, импульс и момент импульса могут принимать лишь определенный дискретный ряд значений.

Для стационарных состояний атома водорода из уравнения Шредингера получается тот же самый набор значений полной энергии  $E$  атома, что и по теории Бора из формулы (3.9):

$$E_n = \frac{m_e \cdot e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}$$

Целое число  $n$  в формуле (3.9) называется **главным квантовым числом**. Главное квантовое число может принимать любые целые значения, начиная от 1.

Орбитальный момент количества движения  $\vec{L} = m\vec{v}\vec{r}$  электрона в атоме может принимать дискретный ряд значений, определяемых формулой:

$$L = \frac{h}{2\pi} \cdot \sqrt{l(l+1)} \quad (3.26),$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $l$  – целое число, начиная от 0.

Число  $l$  называется **орбитальным квантовым числом**. Используя обозначение  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  из формулы (3.26) получим:

$$L = \hbar \sqrt{l(l+1)} \quad (3.27)$$

Оказалось, что квантованные значения в атоме принимают не только полная энергия  $E$  и орбитальный момент  $L$  электрона, но и проекция вектора орбитального момента  $L$  на некоторую избранную ось. При помещении атомов в магнитное поле такой избранной осью для атомов может служить, например, ось  $OZ$ , совпадающая с направлением вектора  $\vec{B}$  магнитной индукции. В этом случае факт квантования проекции  $L_z$  вектора  $\vec{L}$  орбитального момента импульса на ось  $OZ$  означает, что при помещении в магнитное поле вектор орбитального импульса  $\vec{L}$  не может быть ориентирован произвольным образом по отношению к вектору  $\vec{B}$  магнитной индукции.

Возможные значения проекции  $L_z$  момента импульса  $\vec{L}$  на ось определяются формулой:

$$L_z = m\hbar \quad (3.28)$$

где  $m = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$  (3.29)

Число  $m$  называется **магнитным квантовым числом**. Магнитное квантовое число  $m$  не может быть больше орбитального квантового числа  $l$  по той причине, что проекция вектора  $L_z$  на ось  $OZ$  не может быть больше модуля самого вектора  $\vec{L}$ .

Возможные ориентации вектора  $\vec{L}$  относительно оси  $Z$  для случая  $l=2$  показаны на рис. 44.

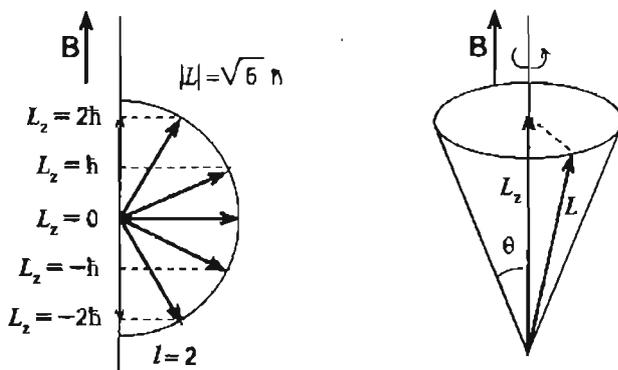


Рис. 44

При изучении спектров щелочных металлов было обнаружено разделение спектральных линий на две очень близко расположенные линии. Из этого факта следовало, что энергетические уровни атома имеют тонкую структуру, разделяются на два подуровня. Для объяснения этого факта была высказана гипотеза о существовании у электрона **собственного** или **внутреннего момента импульса**. В результате взаимодействия с другими электронами в зависимости от ориентации собственного момента импульса электрона могла изменяться его полная энергия. Эта гипотеза получила полное экспериментальное подтверждение.

Наличие собственного момента импульса у электрона заставляет рассматривать его как объект, имеющий собственное вращательное движение. Представление о внутреннем вращении электрона подтверждается и тем, что в экспериментах обнаруживается магнитное поле электрона, подобное полю кругового электрического тока.

Собственный момент импульса электрона называется **спином электрона**. Все электроны обладают одинаковым спином  $s$ , равным:

$$s = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar \quad (3.30)$$

Проекция спина электрона на произвольную ось  $OZ$  квантуется по такому же правилу (3.28), как и проекция орбитального момента импульса и может иметь одно из двух значений (рис. 45):

$$S_z = \frac{1}{2} \hbar \quad \text{или} \quad S_z = -\frac{1}{2} \hbar \quad (3.31)$$

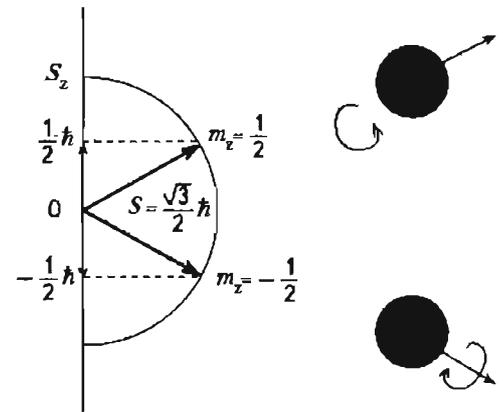


Рис. 45

В единицах постоянной Планка с чертой  $\hbar$  проекция спина электрона может иметь значения  $\pm \frac{1}{2}$ , поэтому часто для краткости говорят, что спин электрона равен  $\frac{1}{2}$ .

Таким образом квантовое состояние электрона в атоме определяется **четырьмя квантовыми числами**: главным квантовым числом  $n$ , определяющим полную энергию электрона, орбитальным квантовым числом  $l$ , определяющим орбитальный момент импульса  $L$  электрона, магнитным квантовым числом  $m$ , определяющим значение проекции орбитального момента импульса  $L_z$  на некоторую ось  $OZ$  и спиновым числом  $S_z$ , определяющим проекцию спина электрона на ось  $OZ$ .

Между главным квантовым числом  $n$  и орбитальным квантовым числом  $l$  всегда выполняется условие:

$$l \leq n - 1 \quad (3.32)$$

В таблице 3.1 представлены все возможные квантовые состояния электронов в атоме водорода для значений главного квантового числа  $n$ , равных 1, 2 и 3. Квантовые состояния электрона с орбитальным квантовым числом  $l$ , равным нулю,  $l=0$ , обозначаются буквой  $s$  с указанием главного квантового числа перед ней; состояния с  $l=1$  обозначаются буквой  $p$ , с  $l=2$  — буквой  $d$  с указанием главного квантового числа.

Таблица 3.1 Возможные квантовые состояния электронов в атоме водорода для значений  $n$ , равных 1, 2, 3

Главное квантовое число $n$	Орбитальное квантовое число $l$ , $l < n-1$	Обозначение квантового состояния электрона	Значение орбитального момента импульса электрона $L = \hbar\sqrt{l(l+1)}$	Магнитное квантовое число $m$ , $ m  <  l $	Значение проекции орбитального момента импульса $L_z = m\hbar$	Проекция спина электрона $S_z$	Число возможных состояний		
n=1	0	1s	0	0	0	$+\frac{1}{2}\hbar$	2		
						$-\frac{1}{2}\hbar$			
n=2	0	2s	0	0	0	$+\frac{1}{2}\hbar$	8		
						$-\frac{1}{2}\hbar$			
	1	2p	$\sqrt{2}\hbar$	+1	$+\hbar$	$+\frac{1}{2}\hbar$			
						$-\frac{1}{2}\hbar$			
						-1		$-\hbar$	$+\frac{1}{2}\hbar$
									$-\frac{1}{2}\hbar$

Таблица 3.1 Возможные квантовые состояния электронов в атоме водорода для значений  $n$ , равных 1, 2, 3 (продолжение)

Главное квантовое число $n$	Орбитальное квантовое число $l$ , $0 \leq l < n$	Обозначение квантового состояния электрона	Значение орбитального момента импульса электрона $L = \hbar \sqrt{l(l+1)}$	Магнитное квантовое число $m$ , $ m  \leq l$	Значение проекции орбитального момента импульса $L_z = m\hbar$	Проекция спина электрона $S_z$	Число возможных состояний							
$n=3$	0	3s	0	0	0	$+\frac{1}{2}\hbar$	18							
						$-\frac{1}{2}\hbar$								
	1	3p	$\sqrt{2}\hbar$	0	+1	$+\hbar$		$+\frac{1}{2}\hbar$						
								$-\frac{1}{2}\hbar$						
								-1	$-\hbar$	$+\frac{1}{2}\hbar$				
										$-\frac{1}{2}\hbar$				
								2	3d	$\sqrt{6}\hbar$	0	+1	$+\hbar$	$+\frac{1}{2}\hbar$
														$-\frac{1}{2}\hbar$
	-1	$-\hbar$	$+\frac{1}{2}\hbar$											
			$-\frac{1}{2}\hbar$											
	-2	$-2\hbar$	$+\frac{1}{2}\hbar$											
			$-\frac{1}{2}\hbar$											

Таблица показывает, что каждому главному квантовому числу  $n = 1, 2, 3$  соответствует  $2n^2$  различных возможных состояний электрона. Эта закономерность выполняется для любых значений главного квантового числа  $n$ .

Квантовомеханическое описание движения электрона принципиально отличается от описания движения тел в классической механике. Например для квантового состояния  $1s$  в атоме водорода квантовомеханическое решение задачи о движении электрона дает ответ в виде функции  $|\Psi|^2$  распределения вероятности пребывания электрона в разных точках пространства. Эта функция оказывается сферически симметричной, то есть никаких плоских боровских электронных орбит в действительности не существует. Не является определенным и расстояние электрона от ядра. Зависимость вероятности нахождения электрона от расстояния  $r$  от ядра в состояниях  $1s$  и  $2s$  атома водорода представлена графиками на рис. 46.

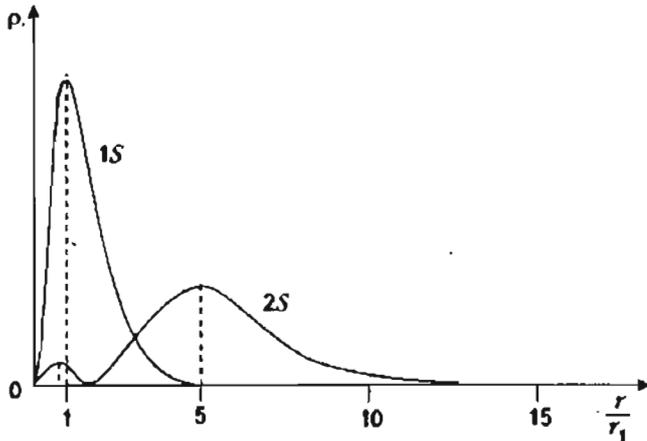


Рис. 46

Расстояние от электрона до ядра отсчитывается по горизонтальной оси в радиусах  $r_1$  первой боровской орбиты. Максимум для состояния  $1s$  на этом графике соответствует радиусу  $r_1$  первой боровской орбиты.

Этот график показывает, что электрон в атоме водорода в основном состоянии может находиться на различных расстояниях от ядра, начиная от нуля и примерно до значения в пять боровских радиусов. Значение первого боровского радиуса соответствует расстоянию от ядра, на котором пребывание электрона наиболее вероятно.

Инерция классического мышления требует какого-то наглядного образа для представления  $s$ -состоя-

ния атома, в котором электрон движется вокруг ядра, бывает в разных местах вокруг него, но его орбитальный момент  $\vec{L} = m\vec{v}\vec{r}$  оказывается равным нулю. Такое движение можно себе представить, например, как колебания электрона вдоль прямой, соединяющей ядро и электрон, или как движение вокруг ядра по эллиптическим орбитам с изменяющимся во времени положением плоскости орбиты в пространстве. При таких движениях среднее значение орбитального момента импульса электрона равно нулю. Однако такие наглядные образы не следуют из квантовомеханического решения задачи о движении электрона. Задача определения «истинной» траектории движения электрона в квантовой механике не имеет смысла.

Конфигурации «электронных облаков», полученные квантовой механикой для различных квантовых состояний электронов в атоме, представлены на рис. 47.

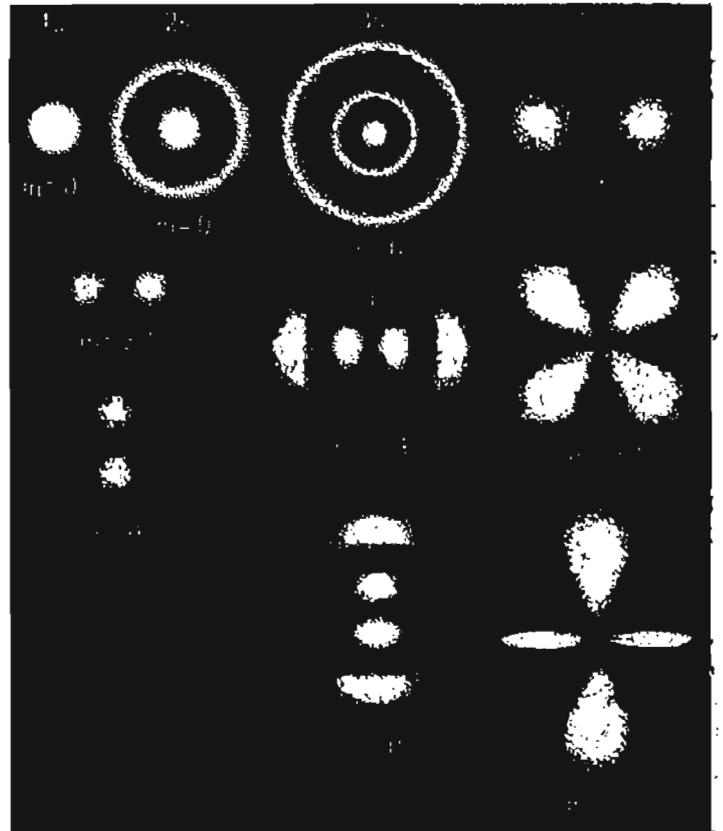


Рис. 47

Соответствие квантовомеханических представлений о структуре «электронных облаков» реальности подтверждается результатами экспериментов,

в которых определяются расстояния между атомами в молекулах и кристаллах, углы между направлениями, по которым устанавливаются связи между атомами.

Так как все электроны в атомах самопроизвольно переходят в состояние с минимальной энергией, то можно было ожидать, что в невозбужденных атомах всех химических элементов все электроны будут находиться в состоянии  $1s$ .

При возбуждении атомов электроны должны переходить на более высокие энергетические уровни, а затем возвращаться в основное состояние, испуская фотоны. Линейчатые спектры атомов разных химических элементов в таком случае должны быть похожими по расположению линий. Однако частоты всех спектральных линий должны увеличиваться при увеличении зарядового номера  $Z$ , так как с увеличением заряда ядра увеличивается полная энергия  $E$  электрона.

Такого типа линейчатые спектры у атомов действительно обнаружены, но не в области видимого света, а в области рентгеновского излучения. Именно путем изучения таких спектров, называемых спектрами характеристического рентгеновского излучения, Мозли определил заряды атомных ядер.

В области же видимого излучения спектры атомов разных химических элементов такого сходства не обнаруживают. Более того, если бы все электроны в атомах с большими значениями зарядового числа  $Z$  находились в состоянии  $1s$ , то для возбуждения атомов требовалась бы энергия в десятки тысяч электронвольт. Но в действительности атомы химических элементов с большими значениями зарядового числа  $Z$  возбуждаются при значениях энергии в несколько электронвольт, как и атомы с малыми значениями зарядового числа.

Проблема распределения электронов в многоэлектронных атомах по квантовым уровням в основном состоянии была решена на основе применения к электронам в атоме принципа Паули.

Немецкий физик Вольфганг Паули в 1925 году сформулировал принцип, согласно которому в любой квантовой системе две или более частицы с полуцелым спином не могут находиться в одном и том же квантовом состоянии.

Электрон обладает полуцелым спином  $\frac{1}{2}$ . В атоме состояние электрона определяется четырьмя квантовыми числами  $n, l, m, s$ . Каждый электрон в атоме должен отличаться от всех остальных хотя бы одним квантовым числом.

При заполнении электронных оболочек в атоме одновременно действуют принцип минимума полной энергии и принцип Паули. Поэтому электроны заполняют все возможные квантовые уровни с минимальным возможным значением энергии при минимальном значении главного квантового числа  $n = 1$ , затем уровни с более высокими значениями энергии при  $n = 2$  и так далее. Совокупность электронов с одинаковым значением главного квантового числа  $n$  в атоме называется **электронной оболочкой**.

Электронные оболочки имеют обозначения  $K, L, M, N, O$  соответственно для значений 1, 2, 3, 4, 5 главного квантового числа  $n$ . Электроны с одинаковыми значениями орбитального квантового числа  $l$  образуют подоболочки, обозначаемые буквами  $s, p, d, f, g$  для значений 0, 1, 2, 3, 4 орбитального квантового числа  $l$ .

Порядок заполнения электронных оболочек в атомах химических элементов от водорода до никеля представлен в таблице 3.2.

Таблица показывает, что до девятнадцатого элемента периодической таблицы химических элементов заполнение электронных оболочек в атомах следует сформулированному выше правилу. Однако, начиная с девятнадцатого элемента наблюдаются отклонения от этого правила — при незаполненной  $M$ -оболочке начинается заполнение  $N$ -оболочки атомов. Это отклонение объясняется тем, что энергетический уровень  $4s$  оказывается ниже уровня  $3d$ .

Особенности строения и заполнения электронных оболочек и подоболочек объясняют физические и химические свойства элементов.

В атомах с полностью заполненными оболочками электроны связаны с ядром наиболее прочно. Такие атомы — He, Ne, Ar, Kr, Xe — обладают самыми большими значениями энергии ионизации и наименее активно вступают в химические связи с другими атомами (рис. 48).

Таблица 3.2 Порядок заполнения электронных оболочек в атомах некоторых химических элементов

Атомный номер элемента Z	Обозначение оболочки	K	L			M			N	
	Обозначение подоболочки	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	
	Символ химического элемента	Число электронов на подоболочке								
1	H	1	—	—	—	—	—	—	—	
2	He	2	—	—	—	—	—	—	—	
3	Li	2	1	—	—	—	—	—	—	
4	Be	2	2	—	—	—	—	—	—	
5	B	2	2	1	—	—	—	—	—	
6	C	2	2	2	—	—	—	—	—	
7	N	2	2	3	—	—	—	—	—	
8	O	2	2	4	—	—	—	—	—	
9	F	2	2	5	—	—	—	—	—	
10	Ne	2	2	6	—	—	—	—	—	
11	Na	2	2	6	1	—	—	—	—	
12	Mg	2	2	6	2	—	—	—	—	
13	Al	2	2	6	2	1	—	—	—	
14	Si	2	2	6	2	2	—	—	—	
15	P	2	2	6	2	3	—	—	—	
16	S	2	2	6	2	4	—	—	—	
17	Cl	2	2	6	2	5	—	—	—	
18	Ar	2	2	6	2	6	—	—	—	
19	K	2	2	6	2	6	—	1	—	
20	Ca	2	2	6	2	6	—	2	—	
21	Sc	2	2	6	2	6	1	2	—	
22	Ti	2	2	6	2	6	2	2	—	
23	V	2	2	6	2	6	3	2	—	
24	Cr	2	2	6	2	6	5	1	—	
25	Mn	2	2	6	2	6	5	2	—	
26	Fe	2	2	6	2	6	6	2	—	
27	Co	2	2	6	2	6	7	2	—	
28	Ni	2	2	6	2	6	8	2	—	

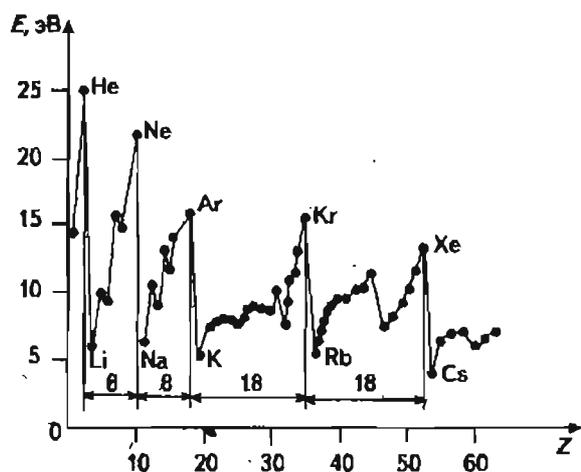


Рис. 48

В атомах с начинающейся застройкой новой оболочки валентный электрон из-за сильного экранирующего действия заполненных оболочек слабо связан с ядром. Такие атомы — Li, Na, K, Rb, Cs — обладают самыми низкими значениями энергии ионизации и очень активно вступают в химические связи с другими атомами.

### Лазер (уровень В)

Согласно представлениям квантовой теории, атомы излучают кванты света — фотоны — при самопроизвольных переходах из возбужденных состояний в основное состояние. Поскольку процесс излучения каждый атом совершает независимо от других атомов, при переходах между одними и теми же уровнями разные атомы излучают фотоны с одинаковой частотой, но фаза колебаний и плоскость поляризации их различны. Такое электромагнитное излучение является некогерентным. Свет от некогерентных источников не дает интерференционной картины, так как разность фаз в световых потоках непрерывно изменяется.

В 1916 году Эйнштейн предсказал возможность особого вида излучения атомов, которое называют **вынужденным** или **индуцированным излучением**. Согласно этому предположению возбужденный атом в поле световой электромагнитной волны переходит из возбужденного состояния  $E_2$  в нормальное состояние  $E_1$  быстрее, если частота электромагнитного излучения совпадает с собственной частотой излучения атома при переходе между этими двумя стационарными состояниями. Вынужденное излучение совпадает по частоте, фазе, плоскости поляризации и направлению распространения с вынуждающим излучением.

С использованием представлений о свете как потоке частиц-фотонов процесс вынужденного излучения можно объяснить как процесс излучения возбужденным атомом индуцированного фотона под воздействием проходящего вблизи атома первичного фотона (рис. 49).

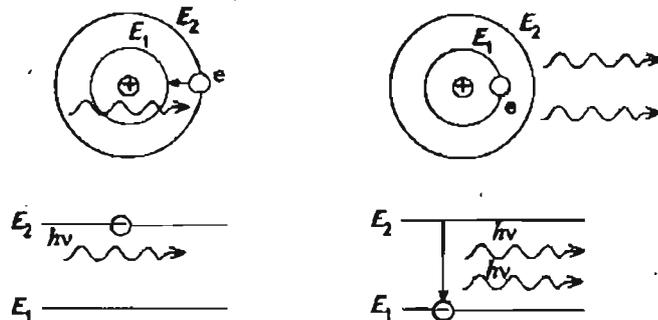


Рис. 49

Экспериментальное открытие и исследование явления индуцированного излучения атомов привело к созданию **лазеров** или **оптических квантовых генераторов**. Слово «лазер» образовано из начальных букв слов в предложении, описывающем на английском языке принцип действия прибора «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation», что означает «Усиление света с помощью индуцированного излучения».

Энергия фотона, способного вызвать индуцированное излучение атома, в точности равна разности энергий атома между двумя стационарными состояниями. Поэтому такие фотоны могут поглощаться атомами, находящимися в основном состоянии. При прохождении фотонов через вещество их число может увеличиваться, если на их пути будет встречаться больше возбужденных атомов, способных испускать индуцированное излучение, чем атомов в нормальном состоянии, поглощающих фотоны.

Состояние вещества, при котором более половины всех атомов находится в возбужденном состоянии, называется **состоянием с инверсной населенностью энергетических уровней**.

Создать состояние с инверсной населенностью уровней простым нагреванием вещества невозможно, так как даже при самых высоких значениях температуры населенность возбужденных уровней не может превысить 50%.

Инверсная населенность уровней может быть достигнута для некоторых атомов, обладающих мета-

**стабильными состояниями.** Метастабильными называют возбужденные состояния, в которых атомы находятся не  $10^{-9}$ – $10^{-8}$  секунды, а более длительное время.

Если атомы некоторого вещества имеют основное состояние с энергией  $E_1$ , метастабильное состояние с энергией  $E_2$  и обычное возбужденное состояние с энергией  $E_3$ , то при переводе атомов в возбужденное состояние  $E_3$  атомы будут быстро переходить в метастабильное состояние  $E_2$  и задерживаться на нем значительное время. Если за это время все новые и новые атомы будут возбуждаться и переходить на уровень  $E_3$  и затем быстро на метастабильный уровень  $E_2$ , то вскоре более половины атомов вещества окажется в метастабильном возбужденном состоянии и возникнет среда с инверсной населенностью уровней (рис. 50).

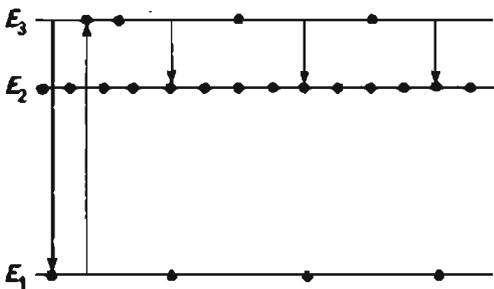


Рис. 50

При прохождении в такой среде одного фотона с энергией

$$h\nu = E_2 - E_1$$

возникнет сначала один фотон индуцированного излучения, два фотона породят еще два фотона и так далее процесс усиления потока фотонов будет лавинообразно нарастать (рис. 51).

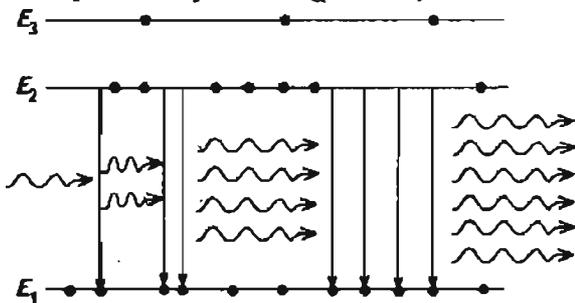


Рис. 51

В лазере среда с инверсной населенностью уровней — активная среда — помещается между двумя строго параллельными плоскими зеркалами.

Перевод более половины атомов среды в метастабильное возбужденное состояние производится, например, кратковременным освещением вещества мощным потоком света или пропусканием электрического разряда через газовую среду.

При переходе атомов из метастабильного состояния в основное сначала фотоны испускаются во всевозможных направлениях. Путь большинства из них в активной среде очень короткий, они не встречают на своем пути ни одного возбужденного атома и не вызывают индуцированного излучения. Те фотоны, которые двигались перпендикулярно плоскости зеркала, многократно проходят через активную среду, отражаясь попеременно от первого и второго зеркала. На длинном пути в активной среде они встречаются с возбужденными атомами и вызывают индуцированное излучение (рис. 52).

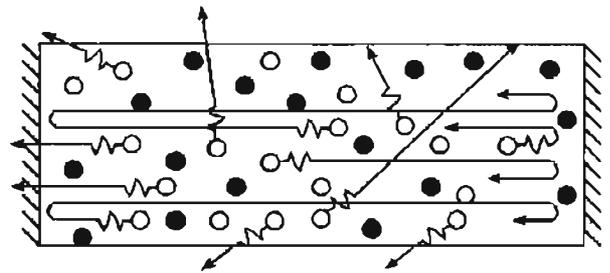


Рис. 52

Индукцированные фотоны движутся в том же направлении, что и первичные и так же многократно отражаются от зеркал и вызывают появление все новых и новых фотонов индуцированного излучения. Процесс усиления светового потока продолжается до перехода большинства возбужденных атомов в основное состояние (импульсный лазер) или до выравнивания числа атомов, переходящих в единицу времени в возбужденное состояние, с числом атомов, возвращающихся в основное состояние (лазер непрерывного действия).

Для вывода светового пучка из пространства между зеркалами одно из зеркал лазера делается частично прозрачным.

Особенностями лазерного излучения являются его монохроматичность, когерентность и очень малая расходимость светового пучка. Малая расходимость светового пучка лазера позволяет осуществлять с помощью световых пучков связь на больших расстояниях.

Когерентность лазерного излучения дает возможность создания трехмерных изображений предметов — голографических изображений.

Лазеры позволяют преобразовывать накапливаемую длительное время электрическую энергию в энергию светового излучения, генерируемого за очень короткий интервал времени,  $10^{-8}$  –  $10^{-10}$  секунды. При этом мощность светового излучения может достигать миллиардов ватт.

Среди различных типов лазеров наиболее широкое распространение в лабораторной практике получили газовые лазеры.

Устройство газового гелий-неонового лазера представлено условно на рисунке 53.

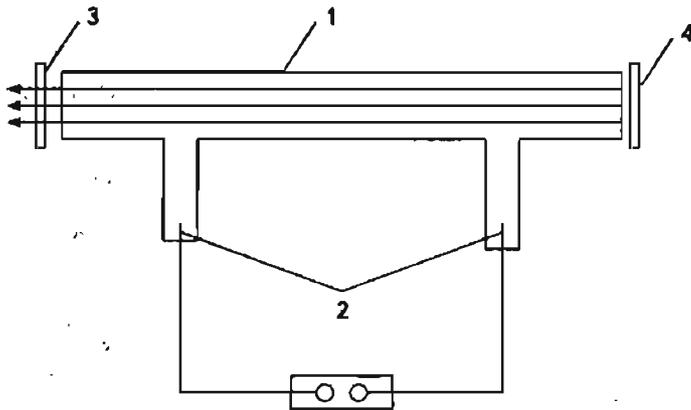


Рис. 53

Стеклянная трубка (1), заполненная смесью гелия с парциальным давлением около  $10^2$  Па и неона с давлением около 10 Па помещается между двумя параллельными зеркалами (3 и 4), из которых одно частично прозрачно. В трубке имеются два электрода (2). При подаче напряжения на электроды в трубке возникает электрический разряд. В плазме электрического разряда атомы неона и гелия возбуждаются при неупругих столкновениях с электронами. Упрощенно возникновение индуцированного излучения в гелий-неоновом лазере можно представить следующим образом. У атомов неона имеются возбужденные уровни  $E_3$  и  $E_2$ . Время жизни атомов в состоянии  $E_3$  значительно больше времени жизни в состоянии  $E_2$  и поэтому возможно создание инверсной заселенности уровня  $E_3$  по отношению к уровню  $E_2$ .

Однако интенсивность индуцированного излучения в чистом неоне очень невелика. В смеси гелия

с неоном интенсивность излучения значительно возрастает, так как у атомов гелия имеется метастабильный возбужденный уровень, практически совпадающий с уровнем  $E_3$  неона. Возбужденные атомы гелия могут передавать свою энергию невозбужденным атомам неона и значительно увеличивать населенность уровня  $E_3$  (рис. 54).

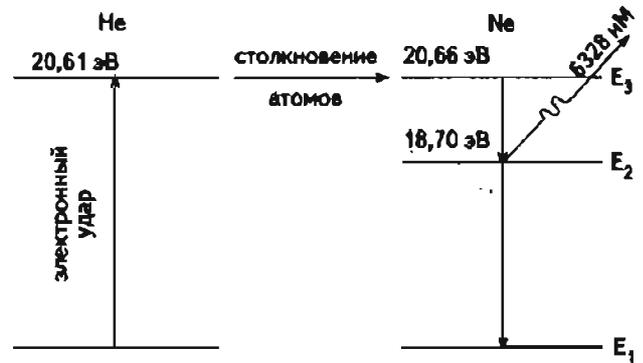


Рис. 54

Контрольная  
работа

### Тест № 3 (уровень А)

1. Открытие атомного ядра было сделано на основе изучения рассеяния частиц при прохождении через тонкие слои вещества. Рассеяние каких частиц исследовал Резерфорд?

- А. Электронов.  
 Б. Протонов.  
 В. Альфа-частиц.  
 Г. Бета-частиц.  
 Д. Гамма квантов.

2. Какие из приведенных ниже трех утверждений соответствуют модели строения атома по Резерфорду?

- 1) Внутри атома имеется положительно заряженное ядро малых размеров, вокруг ядра обращаются отрицательно заряженные электроны.  
 2) В процессе обращения вокруг ядра электроны излучают электромагнитные волны.  
 3) Испускание и поглощение энергии атомами происходит только при переходе из одного стационарного состояния в другое.

- А. Только 1.       Б. Только 2.  
 В. Только 3.       Г. 1 и 2.  
 Д. 1 и 3.

3. Планетарная модель атома Резерфорда обладала серьезным недостатком: атом такого устройства был бы неустойчивым, недолговечным. В чем причина неустойчивости атома по модели Резерфорда?

- А. Из-за слишком больших сил притяжения со стороны положительно заряженного ядра электрон должен упасть на ядро.  
 Б. Из-за непрерывных потерь энергии на излучение электрон должен упасть на ядро.  
 В. Из-за большой удаленности от ядра электрон мог легко преодолеть силы притяжения ядра и покинуть атом.  
 Г. Из-за большой массы ядра электрон под действием гравитационных сил притяжения должен упасть на ядро.  
 Д. Размеры атома слишком малы.

4. Какие из приведенных во втором вопросе теста трех утверждений являются постулатами Бора?

- А. Только 1.       Б. Только 2.  
 В. Только 3.       Г. 2 и 3.  
 Д. 1 и 3.

5. На рис. 55 стрелками указаны возможные переходы атома из одного стационарного состояния в другое. Какой из этих переходов соответствует случаю излучения фотона с максимальной энергией?

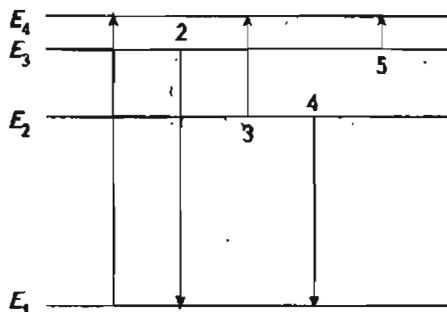


Рис. 55

- А. 1.       Б. 2.  
 В. 3.       Г. 4.  
 Д. 5.

6. По рисунку 55 определите переход с поглощением фотона с минимальной энергией.

- А. 1.       Б. 2.  
 В. 3.       Г. 4.  
 Д. 5.

7. Каково значение частоты кванта, излучаемого при переходе атома из возбужденного состояния с энергией  $E_m$  в основное состояние с энергией  $E_1$ ?

- А.  $\frac{E_m + E_1}{h}$ .       Б.  $\frac{E_1 - E_m}{h}$ .  
 В.  $\frac{E_m}{h}$ .       Г.  $\frac{E_m - E_1}{h}$ .  
 Д.  $\frac{E_1}{h}$ .

8. В каких состояниях вещество испускает свет с линейчатым спектром?

- А. В газообразном при высокой температуре.  
 Б. В газообразном при низкой температуре.  
 В. В жидком при высокой температуре.  
 Г. В твердом при высокой температуре.  
 Д. В любом состоянии при высокой температуре.

9. Имеется ли какое-то соответствие между линейчатыми спектрами излучения и поглощения одного и того же вещества?

- А. Никакого соответствия нет, спектры разные.  
 Б. Спектры сходны, но частоты излучаемого света больше частот поглощаемого света.  
 В. Спектры излучения и поглощения совпадают по частотам.  
 Г. Спектры сходны, но частоты излучаемого света меньше частот поглощаемого света.  
 Д. Общая энергия излучения равна поглощаемой энергии, но частоты линий различны.

10. Какие из перечисленных ниже оптических приборов могут использоваться для разложения узкого пучка света в спектр?

- 1) Стекла́нная призма.

- 2) Дифракционная решетка.  
 3) Стекло́нная линза.
- А. Только 1.  
 Б. Только 2.  
 В. Только 3,  
 Г. 1 и 2.  
 Д. 1, 2, 3.

*Самостоятельная  
работа*

**Самостоятельная работа №3  
(уровень Б)**

1. На рис. 34 представлена схема экспериментальной установки в опыте Франка и Герца. Опишите, между какими электродами прибора изменялось приложенное напряжение, в каком участке цепи производились измерения тока и что было обнаружено в опыте.
2. Какой вывод можно сделать о свойствах атомов ртути на основании результатов опытов Франка и Герца, представленных графиком на рисунке 36?
3. Вычислите частоту  $\nu$  и длину волны  $\lambda$  электромагнитного излучения, испускаемого водородом при переходах атомов из первого возбужденного состояния в основное состояние. Вычислите энергию фотона, испускаемого при этом переходе.
4. Кажется странным, что возбужденные квантовые состояния, в которых атом находится всего лишь миллиардные доли секунды, называют стационарными. Чтобы оценить время существования атома в возбужденном состоянии, используйте масштабы атомного мира и вычислите, сколько «атомных лет» существует возбужденный атом, считая время одного оборота электрона вокруг ядра за один «атомный год». Для расчета используйте сведения о второй бордовской орбите в атоме водорода. Время жизни атома в возбужденном состоянии примерно равно  $10^{-8}$  с.
5. Вычислите длину дебройлевской волны электрона при его движении по первой и второй бо-

ровским круговым орбитам атома водорода. Сравните полученные результаты с длиной этих бордовских орбит. Какое объяснение можно дать полученному результату?

6. Чем отличается электрон в атоме в состоянии  $2s$  от электрона в состоянии  $1s$ ?
7. Что одинаково и что различно у двух электронов в атоме, находящихся в состоянии  $2p$  со значениями магнитного квантового числа  $m = +1$  и  $m = -1$ ?
8. Почему в периодической системе химических элементов начиная с 19-го элемента нарушен порядок заполнения оболочек: при незаполненной оболочке  $M$  начинает заполняться оболочка  $N$ ?
9. Вычислите радиус  $R$  бордовской орбиты электрона в атоме водорода для значения главного квантового числа  $n = 10000$ . Как вы думаете, возможно ли существование атома водорода в таком состоянии в реальности?

*Творческие  
задания*

Оболочка Солнца, испускающая основную часть светового излучения, называется **фотосферой**. Фотосфера состоит в основном из водорода и гелия. Температура фотосферы около 6000 К. При такой температуре значительная часть атомов водорода и гелия ионизирована и вещество находится в плазменном состоянии. Над фотосферой находится более разреженная оболочка, называемая **хромосферой**. Температура хромосферы около 30000 К.

В обычных условиях наблюдаемый спектр излучения Солнца сплошной со слабыми линиями поглощения. При солнечных затмениях, когда свет фотосферы закрыт диском Луны, от хромосферы наблюдается линейчатый спектр излучения. Линии излучения спектра хромосферы находятся в тех самых местах, где на сплошном спектре излучения фотосферы наблюдаются темные линии поглощения.

На основе имеющихся у вас знаний о механизмах излучения и поглощения квантов электромагнитного излучения атомами попробуйте объяснить происхождение спектров фотосферы и хромосферы.

### Наблюдение линейчатых спектров с помощью лазерного диска (уровень В)

Это лабораторное задание может быть выполнено в домашних условиях без применения специальных приборов, если у вас есть лазерный диск от CD-плеера или компьютера. При аккуратном обращении использование лазерного диска в ваших опытах не нанесет ему никакого вреда, так как он будет использоваться лишь для наблюдения отраженного от него света.

На лазерном диске запись произведена нанесением штрихов по спиральной линии. В результате вдоль каждого радиуса имеется система строго периодически повторяющихся участков поверхности, отражающих и рассеивающих свет. Поэтому лазерный диск может быть использован в качестве очень хорошей отражательной дифракционной решетки.

Для наблюдения линейчатого спектра нужно встать на расстоянии 2–3 метров от люминесцентной лампы и расположить лазерный диск примерно на уровне подбородка таким образом, чтобы изображение лампы как в зеркале было видно около центра диска (рис. 56).

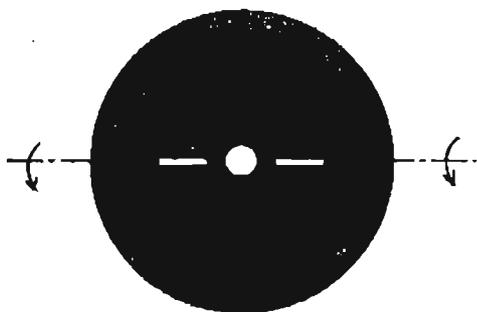


Рис. 56

Затем нужно медленно поворачивать диск вокруг диаметра, параллельного трубке люминесцентной лампы, перемещая изображение трубки лампы от центра диска к его краю. Когда белое изображение скроется за краем диска, у центра диска появится фиолетовая полоса спектра. При дальнейшем вращении диска появятся голубая, зеленая, желтая и красная линии.

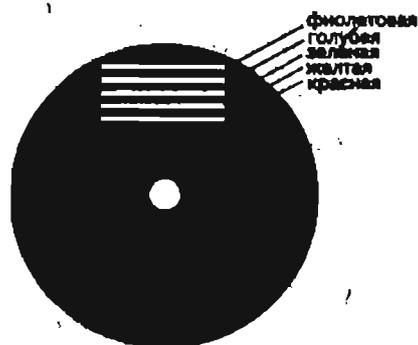


Рис. 57

Если вы хотите пронаблюдать свет в виде тонких линий, какие изображены в учебниках, то получите свет от люминесцентной лампы в виде узкого пучка. Для этого нужно закрыть лампу непрозрачным экраном со щелью шириной примерно 1 мм и длиной 2 см. В качестве экрана можно использовать трубку из оберточной темной бумаги или толстую бумагу для чертежных работ. Для наблюдения спектральных линий от узкой щели в экране нужно поставить диск на расстоянии 15–20 см от щели, плоскость диска нужно расположить под углом  $45^\circ$  к выходящему лучу. Глаз наблюдателя при этом должен находиться под углом  $90^\circ$  к выходящему из лампы пучку света на расстоянии 40–50 см от диска (рис. 58).

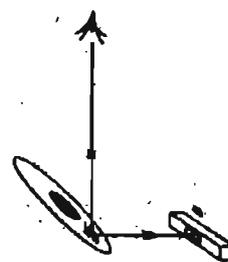


Рис. 58

Поворачивая диск, установите сначала белое изображение щели у края диска, а затем, медленно поворачивая диск вокруг оси, параллельной щели, наблюдайте появление узких спектральных линий.

*Для тех,*

*кому стало интересно*

## Как делаются открытия (уровень В)

### Открытие атомного ядра

*Чтобы делать открытия,  
нужно уметь задавать Природе вопросы  
и понимать ее ответы*

История открытия атомного ядра, как и многих других открытий, началась со случайного наблюдения неожиданного явления.

Резерфорд исследовал прохождение альфа-частиц через газы и тонкие слои металлов. Опыты показали, что и в газах, и в твердых телах альфа-частицы движутся практически прямолинейно, отклоняясь от первоначального направления движения лишь на несколько градусов. Такой результат не вызывал особого удивления, так как альфа-частицы движутся со скоростями порядка 10 000 километров в секунду. Для того, чтобы отклонить так быстро движущийся «снаряд» от первоначального направления движения, нужны очень большие силы. Силы эти могли быть только электрической природы. Отрицательно заряженные электроны не могли оказать существенного воздействия на альфа-частицы, так как масса электрона в 7 тысяч раз меньше массы альфа-частицы.

Если положительный заряд в атоме распределен в шаре радиусом порядка  $10^{-10}$  м, как это предполагалось в модели атома Томсона, то напряженность электрического поля вне атома и внутри него должна быть так мала, что никакого существенного влияния на быстро движущуюся альфа-частицу это поле при одном столкновении не должно было оказывать. Именно такие результаты и наблюдались в опытах.

Правда, очень небольшая доля частиц испытывала отклонения на довольно большие углы и причина таких отклонений была не совсем понятна.

На этом этапе экспериментов сотрудник лаборатории Гейгер обратился к своему шефу Резерфорду с вопросом, не пора ли стажеру Марсдену дать какую-нибудь небольшую тему для самостоятельного экспериментального исследования. Резерфорд согласился и сказал: «Почему бы ему не

посмотреть, не рассеиваются ли  $\alpha$ -частицы на большие углы?»

Марсден провел серию наблюдений и сообщил результат: да, очень немного, но наблюдаются альфа-частицы, отражающиеся от золотой фольги в обратном направлении. Первой реакцией Резерфорда на это сообщение было указание хорошенько почистить стенки экспериментальной установки и повторить наблюдения, так как скорее всего наблюдаемые редкие вспышки обусловлены загрязнением стенок прибора радиоактивным веществом. Повторные наблюдения, выполненные Гейгером, подтвердили существование отраженных частиц. Тогда Резерфорд сам повторил все наблюдения и спланировал дальнейшие исследования для изучения зависимости числа рассеянных частиц от угла рассеяния.

На рисунке 59 представлена схема устройства экспериментальной установки. Радиоактивный источник альфа-частиц  $R$  помещался перед рассеивающей фольгой  $F$ . Узкий пучок частиц выделялся диафрагмой  $D$ . После рассеяния в фольге альфа-частицы попадали на экран  $S$ , покрытый сульфидом цинка, и вызывали в нем световые вспышки. Эти вспышки наблюдали с помощью микроскопа  $M$ . Экран и микроскоп могли вместе с платформой  $A$  вращаться относительно фольги, углы поворота отсчитывались по шкале.

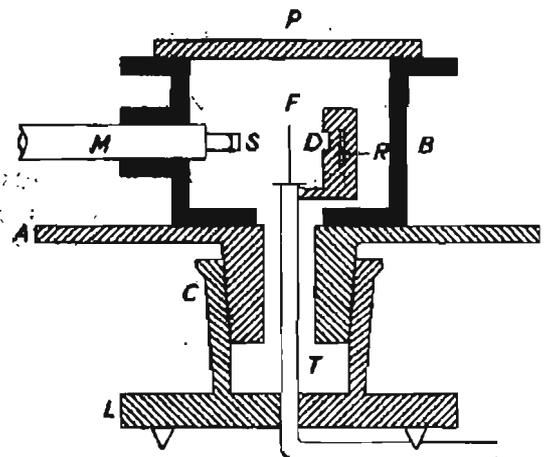


Рис. 59

Позднее, вспоминая о том, как было сделано открытие, Резерфорд сказал: «Я должен признаться по секрету, что не верил, будто это возможно... Это было, пожалуй, самым невероятным событием, какое я когда-либо переживал в моей жизни. Это

было столь же неправдоподобно, как если бы вы произвели выстрел по обрывку папиросной бумаги 15-дюймовым снарядом, а он вернулся бы назад и угодил в вас».

Итак, случай в виде удачной задачи, полученной от Резерфорда, пришел к Марсдену, и он наблюдал новое явление. В совместной статье Гейгер и Марсден сообщили о наблюдении обратного рассеяния альфа-частиц. Однако атомного ядра они не открыли, хотя держали это открытие в своих руках.

Атомное ядро открыл Резерфорд. Вот как рассказал об этом открытии Гейгер: «Однажды Резерфорд вошел в мою комнату, очевидно, в прекрасном расположении духа и сказал: «Теперь я знаю, как выглядит атом!».

Как же разгадал Резерфорд внутреннее устройство атома? Он узнал из результатов опытов Марсдена и Гейгера, что некоторые альфа-частицы, примерно одна из восьми тысяч, отражаются от листочка золотой фольги в обратном направлении. Зная массу и скорость альфа-частицы, можно оценить радиус шара, в котором должны быть сконцентрированы электрический заряд и масса для такого отражения. И эта оценка дала Резерфорду значение порядка  $10^{-15}$  м, что примерно в 100 тысяч раз меньше радиуса атома.

Затем на основании гипотезы о существовании ядра внутри атома Резерфорд вывел формулу для расчета числа частиц, рассеиваемых на разные углы и рассчитал ожидаемое число частиц, рассеиваемых под разными углами.

Зависимости числа рассеивающихся частиц от угла рассеяния при расчетах на основании модели атома Томсона и ядерной модели Резерфорда были совершенно разными. В случае правильности мо-

дели Томсона с распределением положительного заряда во всем объеме атома число рассеиваемых частиц должно было убывать по экспоненциальному закону. Если же прав Резерфорд и атом имеет очень маленькое массивное ядро, то число рассеиваемых частиц должно убывать обратно пропорционально четвертой степени синуса половины угла рассеяния  $\frac{\Phi}{2}$ .

Гейгер и Марсден проделали новую серию экспериментов с подсчетами альфа-частиц, рассеиваемых на разные углы. В опытах они использовали серебряную и золотую фольгу, изменяли толщину фольги. И во всех экспериментах установили полное соответствие наблюдаемого распределения частиц в зависимости от угла рассеяния  $\Phi$  с предсказанным теорией Резерфорда. Вот теперь Резерфорд мог сказать, что он знает, как выглядит атом.

История открытия атомного ядра показывает, что Природа не скрывает от Человека свои тайны, она всегда готова правдиво ответить на правильно заданные ей вопросы, но она никогда не дает случайному человеку готовых ответов на важные свои тайны. Каждый ее ответ на вопрос сам есть новая загадка и разгадать смысл ответа может лишь человек, достойный такого открытия. Резерфорд без сомнения был именно таким человеком, который умел задавать вопросы Природе и умел понимать ее ответы. Он первым разгадал природу альфа- и бета-излучения. Первым доказал, что при радиоактивном распаде происходит превращение атомов одного химического элемента в атомы другого химического элемента, первым осуществил ядерную реакцию — искусственное превращение ядра атома одного химического элемента в ядро атома другого химического элемента.



### Изучив эту тему,

- ♦ вы узнаете, как было открыто атомное ядро и как оно устроено;
- ♦ поймете, какими силами удерживаются протоны и нейтроны в атомном ядре;
- ♦ научитесь определять, какие атомные ядра стабильны, а какие обречены на радиоактивный распад

### Основные понятия:

Зарядовое число • Масса атомного ядра • Изотопы • Атомная единица массы • Массовое число • Протон • Нейтрон • Нуклон • Протонно-нейтронная модель ядра • Энергия связи атомного ядра • Дефект массы • Удельная энергия связи • Ядерные силы • Мезон • Пи-мезон • Стабильные и нестабильные ядра • Динамическая нестабильность • Радиоактивный распад • Альфа-распад • Условие альфа-распада • Бета-распад • Условие бета-распада • Искусственная радиоактивность • Позитрон • Позитронный бета-распад

*Конспект.*

*Таблица. Ссылки*

### Заряд и масса атомного ядра (уровень А)

Экспериментальное определение электрического заряда ядер атомов различных химических элементов в 1913 г. выполнил английский физик Г. Мозли по спектрам рентгеновского излучения. Он обнаружил, что электрический заряд ядра атома каждого химического элемента равен произведению элементарного заряда  $e$  на порядковый номер  $Z$  химического элемента в таблице Д. И. Менделеева:

$$q = eZ$$

(4.1)

Поэтому порядковый номер  $Z$  химического элемента называют зарядовым числом.

Так как атомы в целом нейтральны, определение зарядов атомных ядер одновременно явилось и определением числа электронов, окружающих ядро атома. Число электронов в нейтральном атоме равно зарядовому числу  $Z$  или порядковому номеру химического элемента.

Измерение масс отдельных атомов осуществляется с помощью масс-спектрографа. В масс-спектрографе (см. рис. 60) исследуемое вещество перево-

дится в газообразное состояние и его атомы ионизируются. В вакуумной камере положительные ионы вещества разгоняются электрическим полем. Затем пучок ионов попадает в камеру М, находящуюся между полюсами магнита. Вектор скорости  $\vec{v}$  ионов перпендикулярен вектору  $\vec{B}$  индукции магнита. Под действием силы Лоренца ионы в однородном магнитном поле движутся по окружности. Измерив радиус  $R$  окружности и зная скорость  $v$  иона, можно определить его массу  $m$ .

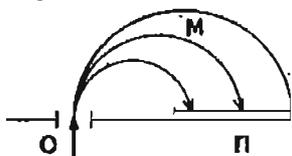


Рис. 60

Измерения масс ионов показали, что большинство химических элементов состоит не из одинаковых атомов, а из смеси атомов с одинаковым зарядом ядра, но с несколькими разными значениями масс.

Атомы с одинаковыми зарядами ядер, но с различными массами называют **изотопами**.

Массы атомов и атомных ядер обычно выражают в **атомных единицах массы** (а. е. м.). Атомная единица массы равна  $\frac{1}{12}$  массы атома углерода  $^{12}_6\text{C}$ .

$$1 \text{ а. е. м.} \approx 1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Округленное до целого числа значение массы атома в атомных единицах называется **массовым числом** изотопа и обозначается буквой  $A$ .

Ядро самого легкого изотопа водорода назвали **протоном**. Масса протона равна  $m_p = 1,672623 \cdot 10^{-27} \approx 1,007276$  а. е. м. его положительный электрический заряд равен элементарному заряду  $e$ .

Оказалось, что протоны имеются во всех атомных ядрах.

Электрический заряд любого атомного ядра  $q = Ze$  обусловлен наличием в нем протонов, порядковый номер элемента в таблице Менделеева или зарядовое число  $Z$  есть число протонов в атомном ядре.

Кроме протонов в атомных ядрах были обнаружены незаряженные частицы с массой примерно равной массе протона. Эти частицы назвали **нейтронами**. Масса нейтрона равна:

$$m_n = 1,674929 \cdot 10^{-27} \approx 1,008665 \text{ а. е. м.}$$

Протоны и нейтроны имеют общее название **нуклоны**.

Согласно **протонно-нейтронной модели**, ядро с зарядовым числом  $Z$  содержит  $Z$  протонов. Массовое число  $A$  ядра есть сумма числа  $Z$  протонов и числа  $N$  нейтронов в ядре:

$$A = Z + N \quad (4.2)$$

Все ядра с одинаковым числом  $Z$  протонов независимо от числа  $N$  нейтронов в них являются атомами одного химического элемента. Ядра с одинаковым числом  $Z$  протонов, но с разными числами  $N$  нейтронов в них являются ядрами **изотопов** одного химического элемента. Химические свойства изотопов одного элемента одинаковы, так как при одинаковом заряде ядра они обладают одинаковым строением электронных оболочек. Физические свойства ядер изотопов одного химического элемента различны из-за различного содержания в них нейтронов. Изотоп обозначается символом химического элемента  $X$  с указанием слева внизу атомного номера  $Z$  и слева сверху массового числа  $A$ :



Например, изотоп гелия, содержащий в ядре два протона и один нейтрон, обозначается символом  ${}^3_2\text{He}$ .

### Энергия связи ядра (уровень $A$ )

Любое атомное ядро можно разделить на составляющие его протоны и нейтроны. В процессе такого разделения необходимо совершение работы против действия сил ядерного притяжения. В результате совершения этой работы потенциальная энергия системы разделенных протонов и нейтронов увеличивается по сравнению с их энергией в связанном состоянии внутри ядра. Энергия, которую нужно затратить для разделения ядра на составляющие его нуклоны называется **энергией связи атомного ядра**.

При соединении свободных протонов и нейтронов в атомное ядро выделяется энергия, равная энергии связи ядра.

Изменение  $\Delta E$  полной энергии системы взаимодействующих тел связано с изменением  $\Delta m$  массы системы тел уравнением взаимосвязи массы и энергии

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 \quad (4.3)$$

где  $c$  — скорость света в вакууме.

При соединении протонов и нейтронов в атомное ядро происходит выделение энергии, полная энер-

тия системы частиц убывает, следовательно, изменение энергии  $\Delta E$  и изменение массы  $\Delta m$  системы частиц имеет отрицательный знак. Это значит, что масса атомного ядра  $m_a$  меньше суммы  $Z \cdot m_p$  масс свободных протонов и  $N \cdot m_n$  масс свободных нейтронов, из которых образовалось атомное ядро:

$$m_a < Z \cdot m_p + N \cdot m_n \quad (4.4)$$

Разность масс свободных протонов и нейтронов и массы атомного ядра называется дефектом массы  $\Delta m$  атомного ядра:

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_a \quad (4.5)$$

Энергия связи атомного ядра  $E_{св}$  равна произведению дефекта массы ядра на квадрат скорости света:

$$E_{св} = \Delta m \cdot c^2 \quad (4.6)$$

Существование дефекта масс атомных ядер установлено экспериментально путем измерений масс атомных ядер с помощью масс-спектрометров.

По измеренному значению дефекта массы атомного ядра определяется его энергия связи.

Для сравнения атомных ядер по прочности связи в них нуклонов используется физическая величина, называемая удельной энергией связи. Удельной энергией связи нуклонов в атомном ядре называется отношение энергии связи ядра  $E_{св}$  к числу  $A$  нуклонов.

Удельная энергия связи нуклона в ядре показывает среднее значение энергии, затрачиваемой на освобождение одного нуклона из ядра при полном разделении ядра на составляющие его нуклоны. На рис. 61 представлен график зависимости удельной энергии связи атомных ядер от массового числа.

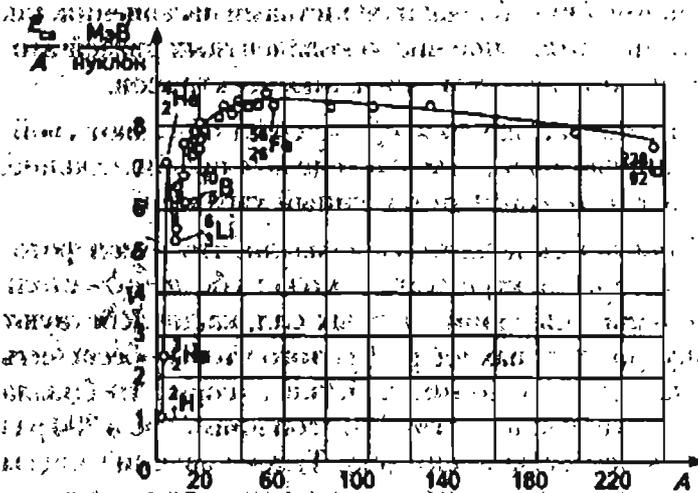


Рис. 61

График показывает, что удельная энергия связи нуклонов в легких атомных ядрах составляет 1–2,5 мегаэлектронвольт. С увеличением массового числа до значений  $A = 50 - 80$  она возрастает почти до 9 Мэв и затем медленно убывает до значения 7,6 Мэв у ядра атома урана.

Значения удельной энергии связи нуклонов в атомных ядрах в сотни тысяч раз превышают значения энергии связи электронов в атомах.

Это означает принципиальную возможность освобождения ядерной энергии при осуществлении ядерных превращений в количествах, в сотни тысяч раз превышающих количества энергии, освобождающиеся при осуществлении атомных превращений на единицу массы вещества.

## Ядерные силы (уровень Б)

Замечательной особенностью науки является бесконечность процесса познания мира. Каждое новое экспериментальное открытие есть ответ Природы на вопрос Человека. Каждый ответ дает возможность Человеку понять то, что он не понимал ранее и понять вместе с тем, какой же следующий вопрос теперь нужно задать Природе. Этот процесс особенно наглядно проявляется в развитии физики атома и элементарных частиц.

Как только был найден ответ на вопрос, из чего состоит атомное ядро (из протонов и нейтронов), сейчас же потребовалось найти ответ на следующий вопрос: а какими силами удерживаются в ядре протоны и нейтроны?

К моменту открытия состава ядра в физике были известны два типа взаимодействия тел — гравитационное и электромагнитное. Электромагнитное взаимодействие протонов в ядре проявляется в форме сил кулоновского отталкивания. Протоны в атомном ядре находятся на расстояниях порядка  $10^{-15}$  м друг от друга.

На таких малых расстояниях силы кулоновского отталкивания между ними очень велики. Вопреки действию кулоновских сил отталкивания протоны не разлетаются из ядра в разные стороны. Значит, в ядре между протонами и нейтронами действуют еще и силы притяжения, превосходящие кулоновские силы отталкивания.

Первый возможный кандидат на роль таких связывающих сил — силы гравитационного взаимодействия.

Вычислим отношение кулоновской силы отталкивания  $F_e$  двух протонов к силе их гравитационного притяжения  $F_g$  на некотором расстоянии  $r$ .

$$F_e = k \frac{e \cdot e}{r^2}, \quad F_g = G \frac{m_p \cdot m_p}{r^2},$$

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{ke^2}{G \cdot m_p^2} = \frac{9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \text{ Кл}^{-2} (1,6 \cdot 10^{-19})^2 \text{ Кл}^2}{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \text{ кг}^{-2} \cdot (1,67 \cdot 10^{-27})^2 \text{ кг}^2} \approx 1,2 \cdot 10^{36}$$

Сравнение этих сил показывает, что силы кулоновского отталкивания между протонами в атомном ядре в  $\sim 10^{36}$  раз превосходят силы гравитационного притяжения. Столь большое превосходство очень трудно наглядно представить.

Примерно во столько раз масса Солнца ( $\sim 2 \cdot 10^{30}$  кг) больше массы одного кубического сантиметра воздуха ( $\sim 1,2 \cdot 10^{-6}$  кг).

Превосходство сил кулоновского отталкивания над силами гравитационного притяжения между протонами позволяет из факта существования устойчивых атомных ядер сделать вывод, что между протонами и нейтронами в ядре действуют силы притяжения неизвестного до сих пор вида. Эти силы назвали ядерными силами.

Экспериментальное изучение свойств ядерных сил оказалось возможным в опытах, подобных опыту Резерфорда по рассеянию альфа-частиц. Исследование рассеяния протонов на протонах, протонов на нейтронах, нейтронов на нейтронах показали, что ядерные силы притяжения одинаково действуют в парах протон-протон, протон-нейтрон, нейтрон-нейтрон. Неразличимость протона и нейтрона в отношении действия ядерных сил позволяет рассматривать эти две частицы как два состояния одной частицы — нуклона.

Поэтому на вопрос о составе атомного ядра одинаково верными являются ответы: «Ядро состоит из протонов и нейтронов» или «Ядро состоит из нуклонов».

Ядерные силы существенно отличаются от гравитационных и кулоновских сил рядом особенностей.

Во-первых, они иначе изменяются с изменением расстояния. Сила ядерного притяжения между двумя протонами на расстоянии  $10^{-15}$  м от центра

протона примерно в 35 раз больше кулоновской силы отталкивания. С увеличением расстояния ядерные силы очень быстро убывают и уже на расстоянии  $1,4 \cdot 10^{-15}$  м действие ядерных сил пренебрежимо мало по сравнению с кулоновскими силами. По этой причине ядерные силы называют короткодействующими силами. Из-за короткого радиуса действия ядерные силы не оказывают никакого влияния на атомном уровне строения вещества, когда расстояния между атомными ядрами в сотни тысяч раз превышают радиус действия ядерных сил.

Во-вторых, ядерные силы обнаруживают свойство насыщения. Силы гравитационного или кулоновского взаимодействия двух тел не зависят от того, с каким числом других тел еще взаимодействует каждое из этих двух тел.

Солнце, например, одинаково притягивает Землю независимо от того, взаимодействует ли при этом оно с Юпитером или не взаимодействует. Иное дело взаимодействие нуклонов в ядре. Сила взаимодействия между двумя нуклонами в ядре зависит не только от расстояния между ними, но и от того, с каким числом других нуклонов еще взаимодействует в данный момент каждый из них. Одновременно каждый нуклон способен вступить в ядерное взаимодействие лишь с небольшим числом соседних с ним нуклонов. В этом отношении взаимодействие нуклонов в ядре оказывается сходным со взаимодействием атомов в молекулах или кристаллах с помощью ковалентной связи.

Ковалентные связи между атомами образуются в результате взаимного обмена валентными электронами. Они обладают свойствами насыщения, так как максимальное число ковалентных связей атома равно числу его валентных электронов.

Из того факта, что ядерные силы обладают свойством насыщения, можно сделать предположение, что эти силы имеют обменный характер.

Теоретические расчеты показали, что обмен фотонами или электронами не может обеспечить столь больших значений ядерных сил, какие существуют внутри атомных ядер. Для того чтобы объяснить такое сильное взаимодействие, теория требовала существование частиц с массой примерно в 200 раз больше массы электрона. Такое значение массы промежуточное между массой электрона и массой протона, поэтому гипотетические частицы называ-

ли мезонами (от греческого *mesos* – средний, промежуточный). Предсказанные теорией частицы были обнаружены экспериментально в 1947 году. Их назвали пи-мезонами или пионами.

Существуют три вида пи-мезонов: положительный  $\pi^+$ , отрицательный  $\pi^-$  и нейтральный  $\pi^0$  мезоны. Масса заряженного мезона равна примерно 274 массам электрона, масса нейтрального мезона равна 264 массам электрона.

Обменное взаимодействие нуклонов с помощью пи-мезонов имеет принципиальное отличие от обменного взаимодействия атомов с помощью электронов. При образовании ковалентных связей обмен осуществляется частицами, являющимися составной частью атомов. Пи-мезоны не являются составной частью протонов и нейтронов, при испускании пи-мезона масса протона не убывает на 274 электронных массы. Происходят совсем другие процессы. Например, протон, испустив пи-плюс мезон, превращается в нейтрон. Другой нейтрон, захватив испущенный пи-мезон, превращается в протон (рис. 62):

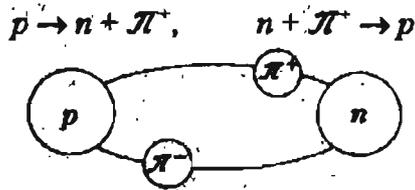


Рис. 62

Такого типа превращения невозможны согласно законам классической физики. Масса протона меньше массы нейтрона и пи-мезона

$$m_p < m_n + m_\pi,$$

следовательно и собственная энергия протона меньше собственной энергии нейтрона и пи-мезона

$$m_p c^2 < m_n c^2 + m_\pi c^2.$$

Однако, согласно законам квантовой механики такие превращения возможны при условии, что происходящее в таком процессе самопроизвольное изменение энергии системы  $\Delta E$ , нарушающее закон сохранения энергии, удовлетворяет соотношению неопределенностей (3.25)

$$\Delta E \cdot \Delta t > \hbar,$$

где  $\Delta t$  – интервал времени, в течение которого происходит такое отклонение. Зная изменение энергии  $\Delta E = m_\pi c^2$ , можно вычислить возможный ин-

тервал времени  $\Delta t$  пребывания пи-мезона вне нуклона без нарушения закона сохранения энергии в пределах соотношения неопределенностей:

$$\Delta t = \frac{\hbar}{\Delta E} \quad (4.7)$$

Умножив этот интервал времени  $\Delta t$  на максимальное возможное значение скорости, равное скорости света  $c$ , мы получим максимальное расстояние  $r$ , на которое пи-мезон может удалиться от протона без нарушения закона сохранения энергии в пределах соотношения неопределенностей. Подобный расчет дает для пи-мезона расстояние  $r$  порядка  $10^{-15}$  м. Это и есть радиус действия сил обменного взаимодействия между нуклонами.

### Ядерные спектры (уровень Б)

Исследования взаимодействий атомных ядер с заряженными частицами и гамма-квантами показали, что атомные ядра, как и атомы, могут изменять свою внутреннюю энергию только квантованно, определенными порциями. Атомное ядро каждого изотопа обладает своим особым спектром возможных энергетических состояний. Как и атомы, атомные ядра бесконечно долго могут находиться в основном состоянии с минимальным запасом энергии. При получении избытка энергии в результате столкновения с какой-либо частицей или поглотив гамма-квант, ядро переходит в одно из возможных квантовых состояний с большим запасом энергии. В возбужденном состоянии атомное ядро находится лишь  $10^{-13} - 10^{-17}$  секунды и затем возвращается в основное состояние, освобождаясь от избытка энергии испусканием гамма-кванта.

Поскольку у ядер каждого изотопа свой набор возможных квантовых энергетических состояний, то и линейчатый спектр гамма-излучения у каждого изотопа особенный.

Как по оптическим линейчатым спектрам исследуются свойства атомов химических элементов, так по спектрам гамма-излучения изучаются свойства атомных ядер изотопов.

Существенным отличием ядерных гамма-спектров от атомных оптических спектров является в сотни тысяч или миллионы раз большая энергия гамма-квантов по сравнению с энергией фотонов видимого света.

Пример схемы энергетических уровней атомного ядра приведен на рисунке 63.

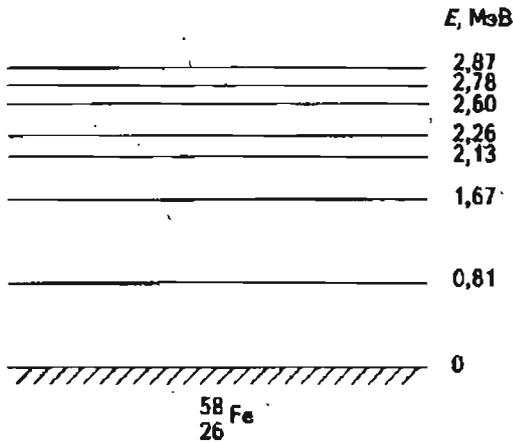


Рис. 63

Изучение линейчатых спектров излучения атомных ядер позволило выяснить многие особенности строения атомных ядер. Оказалось, что нуклоны в атомных ядрах подобно электронам в атомах подчиняются принципу Паули: два нуклона не могут одновременно находиться в ядре в одном и том же квантовом состоянии. Поскольку протоны обладают полужелым спином, на самом низком энергетическом уровне могут находиться одновременно два протона с противоположной ориентацией спина. При возникновении ядра, содержащего три протона, третий протон должен перейти на более высокий уровень. Как в атоме каждому новому энергетическому уровню соответствует новая энергетическая оболочка, так и в ядре протоны и нейтроны заполняют оболочки. Заполненным оболочкам из протонов соответствуют числа 2, 8, 20, 28, 50, 82.

Как и атомы, ядра с заполненными оболочками оказываются наиболее прочно связанными системами частиц. Они обладают повышенными значениями удельной энергии связи, с меньшей вероятностью вступают во взаимодействия с другими ядрами и частицами.

Нейтроны заполняют свои собственные оболочки с такими же значениями чисел, как у протонов.

Ядра с заполненными протонами и нейтронами оболочками особенно прочны и устойчивы. Первый пример такого ядра – ядро изотопа гелия  ${}^4_2\text{He}$  (или альфа-частица), в котором все протоны и нейтроны находятся на самом низком энергетическом уровне и этот уровень заполнен (рис. 64).

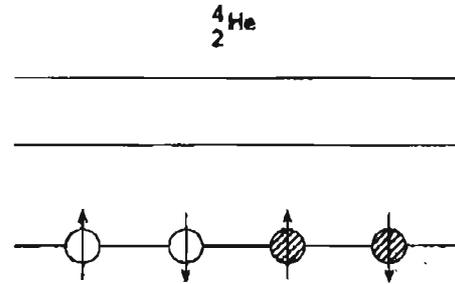


Рис. 64

В ядре изотопа лития  ${}^6_3\text{Li}$  один протон и один нейтрон вынуждены заполнять более высокий энергетический уровень (рис. 65). В результате удельная энергия связи нуклонов в ядре изотопа лития  ${}^6_3\text{Li}$  оказывается значительно ниже удельной энергии связи нуклонов в ядре изотопа гелия  ${}^4_2\text{He}$  (см. задачи 1 и 2 в самостоятельной работе и рис. 61).

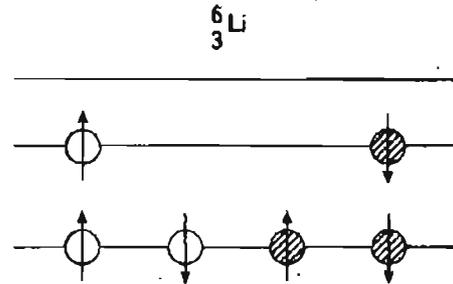


Рис. 65

### Стабильные и нестабильные ядра (уровень Б)

Ядерные силы притяжения между протонами на коротких расстояниях в десятки раз превосходят кулоновские силы отталкивания, между нейтронами же вообще не действуют силы кулоновского отталкивания. Поэтому можно было ожидать существования атомных ядер с любыми комбинациями чисел протонов и нейтронов в них. В действительности существуют далеко не всякие атомные ядра, какие могли бы быть.

На рис. 66 представлена диаграмма распределения стабильных и радиоактивных изотопов по числу содержащихся в них протонов  $Z$  и нейтронов  $N$ . Стабильные ядра представлены черными квадратами. Белыми квадратами представлены радиоактивные ядра. Стабильные ядра располагаются узкой полосой примерно вдоль диагонали диаграммы. Нестабильные ядра образуют вокруг них немало более широкую полосу.

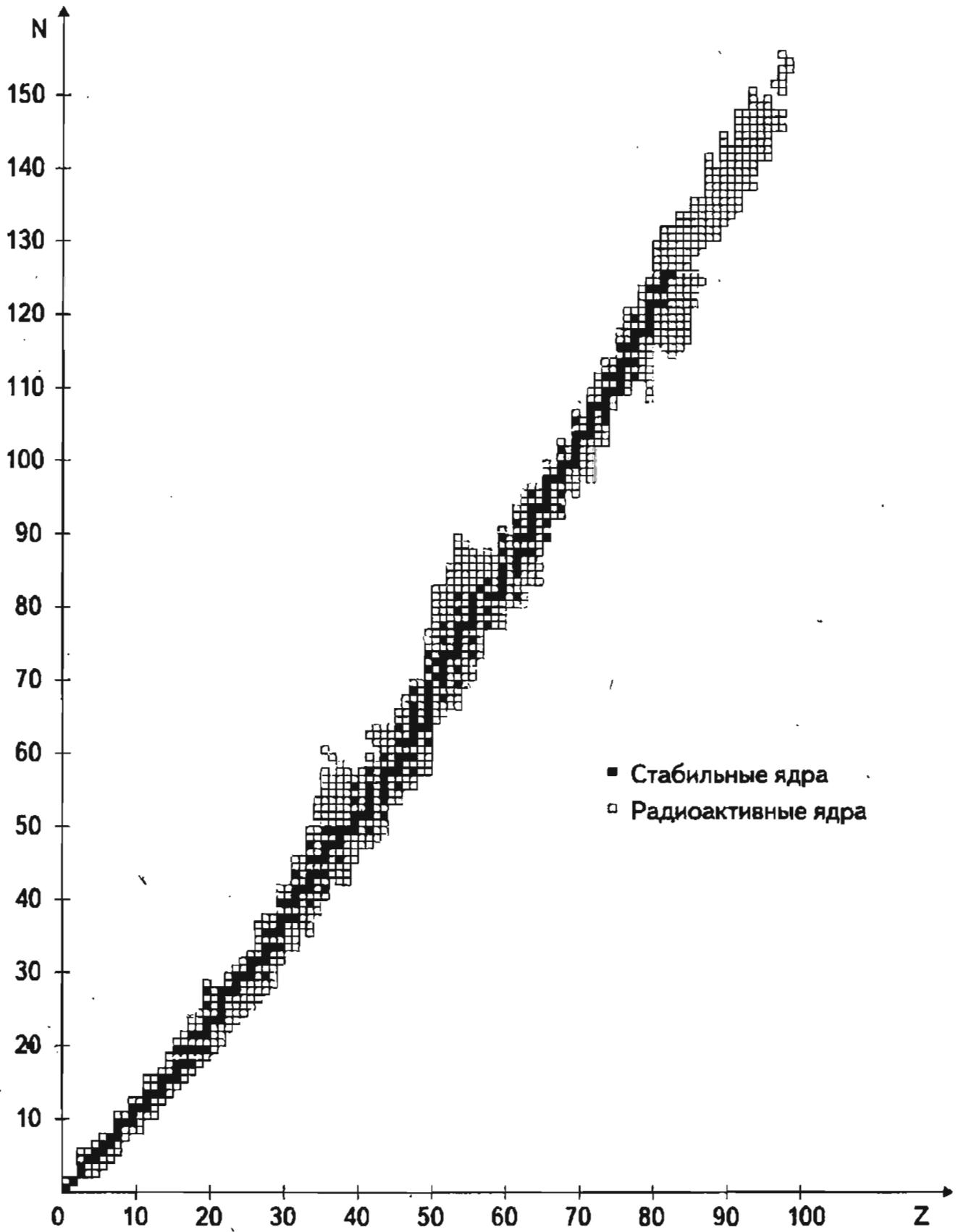


Рис. 66

Возможность существования устойчивого ядра из  $A$  нуклонов определяется принципом минимума энергии системы.

Некоторые системы из протонов и нейтронов обладают небольшим избытком энергии и находятся на грани устойчивости. Они не распадаются мгновенно, но каждое такое ядро может с некоторой вероятностью  $\lambda$  испытать самопроизвольное превращение в другое ядро и избавиться при этом от избытка энергии. Такое самопроизвольное превращение ядер и называется радиоактивным распадом.

Существует два вида самопроизвольных превращений атомных ядер — динамическая нестабильность и бета-распад.

Динамической нестабильностью называется любое превращение атомного ядра с изменением числа нуклонов в нем. Это, например, выброс из ядра группы из двух протонов и двух нейтронов, называемый альфа-распадом, выброс протона или нейтрона или самопроизвольное деление ядра на две примерно равные части.

Для выяснения природы альфа-излучения Резерфорд выполнил замечательный опыт. Он поместил радиоактивный элемент, испускающий альфа-излучение, в стеклянную трубку с такими тонкими стенками, что альфа-излучение проникало сквозь них. Сама трубка с радиоактивным веществом была помещена внутрь другой стеклянной трубки с толстыми стенками. Из второй трубки был выкачан воздух. Через две недели после начала эксперимента во второй трубке по линейчатому спектру излучения было обнаружено небольшое количество газа гелия.

Этим опытом было доказано, что альфа-частица является ядром атома гелия.

Атомное ядро изотопа  ${}^A_Z X$  способно к альфа-распаду, если масса этого ядра  $m_x$  больше суммы масс ядра  $m_y$  изотопа  ${}^{A-4}_{Z-2} Y$  и альфа-частицы  $m_\alpha$ :

$$m_x > m_y + m_\alpha \quad (4.8)$$

Изучение альфа-распада показало, что из одинаковых ядер альфа-частицы вылетают с одинаковой кинетической энергией. Эту энергию они приобретают в результате действия кулоновских сил отталкивания между альфа-частицей и ядром-продуктом.

Удивительным является факт необратимости явления альфа-распада. Если альфа-частицу попытаться «втолкнуть» обратно в то ядро, из которого она вылетела, то энергия альфа-частицы оказывается недостаточной для преодоления действия кулоновских сил отталкивания ядра продукта. Эту особенность альфа-распада объясняет квантовая механика на основе представлений о волновых свойствах частиц.

На рисунке 67 альфа-распад ядра изотопа урана  ${}^{238}_{92} U$  представлен диаграммой энергетических уровней исходного ядра  ${}^{238}_{92} U$  и ядра-продукта  ${}^{234}_{90} Th$  со стрелками, указывающими возможные переходы с испусканием альфа-частиц и гамма-квантов. Диаграмма показывает, что возможны два варианта превращения ядра урана 238 в ядро тория 234. В одном варианте происходит выброс альфа-частицы с энергией 4,18 МэВ с образованием ядра тория в основном состоянии. В другом происходит испускание альфа-частицы с энергией 4,13 МэВ с образованием ядра тория в возбужденном состоянии. Затем ядро тория переходит в основное состояние с испусканием гамма-кванта с энергией 0,05 МэВ.

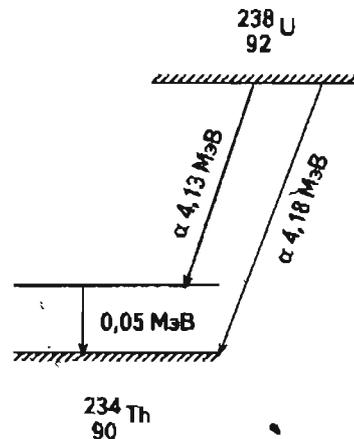


Рис. 67

Бета-распад есть процесс самопроизвольного изменения зарядового числа  $Z$  атомного ядра в результате превращения нейтрона в протон или протона в нейтрон в атомном ядре без изменения массового числа  $A$ .

Возможность превращения нейтрона в протон в атомном ядре легко объяснима, так как масса нейтрона  $m_n$  превышает массу протона  $m_p$  более чем на две массы электрона  $m_e$ . Избыток массы у нейтрона по сравнению с суммой масс протона и электрона означает и избыток энергии. Следовательно,

превращение нейтрона в протон и электрон не противоречит закону сохранения энергии. Нет препятствий и со стороны закона сохранения электрического заряда, так как сумма зарядов протона и электрона равна нулю. Однако есть еще один закон сохранения — закон сохранения момента импульса.

Момент импульса является мерой вращательного движения тел. В любой замкнутой системе момент импульса остается неизменным при любых взаимодействиях и превращениях внутри системы. Момент импульса нейтрона (спин нейтрона) равен  $\frac{1}{2}\hbar$ , такими же спинами обладают электрон и протон. Сумма моментов импульсов протона и электрона может быть равной только  $\hbar$  или 0, так как спины частиц ориентируются параллельно или антипараллельно. Следовательно, закон сохранения момента импульса запрещает превращение нейтрона в протон и электрон. Однако, бета-распады атомных ядер происходят, из ядер вылетают электроны, называемые бета-частицами, а в ядре-продукте число протонов после бета-распада увеличивается на единицу, как будто бы подтверждая превращение нейтрона в протон и электрон.

Выход из создавшегося противоречия между наблюдаемым фактом и теорией предложил в 1931 году немецкий физик Вольфганг Паули, выдвинув гипотезу о существовании в природе еще одной элементарной частицы — нейтрино. Эта частица

должна обладать спином  $\frac{1}{2}\hbar$ , не иметь электрического заряда и обладать очень малой массой. Если такая частица существует, то при бета-распаде нейтрон распадается не на две, а на три частицы с полусуммарным спином и закон сохранения момента импульса не нарушается.

Гипотеза Паули о существовании нейтрино позднее получила экспериментальное подтверждение.

Частицу, испускаемую при превращении нейтрона в протон, назвали антинейтрино. Ее обозначают греческой буквой «ню» со значком «-» сверху:  $\bar{\nu}$ .

Превращение нейтрона в протон, электрон и антинейтрино записывается символически:



Естественно возникает вопрос, почему же нейтроны превращаются в протоны только внутри ядер некоторых изотопов, а не во всех атомных ядрах?

При соединении протонов и нейтронов в ядро выделяется энергия связи и масса ядра убывает на величину дефекта массы  $\Delta m$ . Уменьшается соответственно энергия, приходящаяся на один нейтрон в ядре. Превращение нейтрона в протон в ядре изотопа  ${}^A_Z X$  возможно в том случае, если масса исходного ядра  $m_x$  больше суммы массы  $m_y$  ядра-продукта бета-распада  ${}^A_{Z+1} Y$  и  $m_e$  электрона:

$$m_x > m_y + m_e \quad (4.10)$$

Примером естественного бета-радиоактивного изотопа является изотоп углерода 14. В результате бета-распада зарядовое число  $Z$  ядра увеличивается на единицу и ядро углерода 14 превращается в ядро азота 14. Схема распада ядра углерода приведена на рисунке 68.

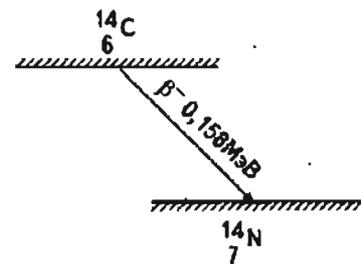
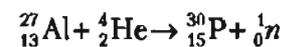
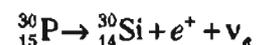


Рис. 6.68

В 1934 году Фредерик и Ирен Жолио-Кюри обнаружили, что при облучении алюминия альфа-частицами происходит превращение ядер алюминия в ядра фосфора с испусканием нейтронов:



Ядра изотопа фосфора оказались радиоактивными. Они испускали позитроны — частицы с массой электрона, но с положительным элементарным электрическим зарядом, и нейтрино. Продуктом распада ядра изотопа фосфора 30 является ядро изотопа кремния 30:



Это было открытие возможности искусственно создавать радиоактивные изотопы путем бомбардировки стабильных ядер альфа-частицами и одновременно открытие нового вида радиоактивности — позитронного бета-распада.

При позитронном бета-распаде внутри ядра происходит превращение протона в нейтрон по схеме



Как же может превратиться протон в нейтрон и позитрон, если масса свободного нейтрона больше массы свободного протона?

Способность к позитронному распаду обнаруживают такие атомные ядра, в которых уменьшение количества протонов на единицу за счет превращения протона в нейтрон приводит к уменьшению полной энергии ядра за счет уменьшения энергии кулоновского взаимодействия протонов в ядре.

Ядро изотопа  ${}^A_Z X$  может испытывать позитронный бета-распад, если его масса больше суммы массы ядра изотопа  ${}^{A-1}_{Z-1} Y$  и массы  $m_e$  электрона:

$$m_x > m_y + m_e \quad (4.12)$$

*Контрольные  
работы*

### Тест №4 (уровень А)

1. В атомном ядре содержится 25 протонов и 30 нейтронов. Каким положительным зарядом, выраженным в элементарных электрических зарядах  $+e$ , обладает это атомное ядро?

- А.  $+5e$ .                       Б.  $+25e$ .  
 В.  $+30e$ .                       Г.  $+55e$ .  
 Д. 0.

2. Что одинаково у атомов разных изотопов одного химического элемента и что у них различно?

- А. Одинаковы заряды и массы атомных ядер, различны химические свойства атомов.  
 Б. Одинаковы заряды ядер, различны массы ядер и химические свойства атомов.  
 В. Одинаковы заряды ядер и химические свойства атомов, различны массы ядер.  
 Г. Одинаковы массы ядер, различны заряды ядер и химические свойства атомов.  
 Д. Одинаковы массы ядер и химические свойства атомов, различны заряды ядер.

3. Из каких частиц состоят ядра атомов?

- А. Из протонов.  
 Б. Из нейтронов.  
 В. Из протонов, нейтронов и электронов.  
 Г. Из протонов и нейтронов.  
 Д. Из протонов и электронов

4. В атомном ядре содержится  $Z$  протонов и  $N$  нейтронов. Чему равно массовое число  $A$  этого ядра?

- А.  $Z$ .                                       Б.  $N$ .  
 В.  $Z-N$ .                                   Г.  $N-Z$ .  
 Д.  $Z+N$ .

5. Сколько электронов содержится в электронной оболочке нейтрального атома, у которого ядро состоит из 6 протонов и 8 нейтронов?

- А. 6.     Б. 8.  
 В. 2.     Г. 14.  
 Д. 0.

6. Масса атомного ядра из  $Z$  протонов и  $N$  нейтронов равна  $m_x$ , масса протона  $m_p$ , масса нейтрона  $m_n$ . Чему равна энергия связи ядра?

- А.  $m_x c^2$ .  
 Б.  $(m_x + Z \cdot m_p + N \cdot m_n) c^2$ .  
 В.  $(m_x - Z \cdot m_p - N \cdot m_n) c^2$ .  
 Г.  $(Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_x) c^2$ .  
 Д.  $(Z \cdot m_p + N \cdot m_n) c^2$ .

7. Выделяется или поглощается энергия при образовании атомного ядра из свободных протонов и нейтронов?

- А. Выделяется.  
 Б. Поглощается.  
 В. При образовании легких ядер выделяется, при образовании тяжелых ядер поглощается.  
 Г. При образовании легких ядер поглощается, при образовании тяжелых ядер выделяется.  
 Д. Энергия не выделяется и не поглощается.

8. Энергия связи ядра из двух протонов и трех нейтронов равна 27,34 МэВ. Чему равна удельная энергия связи ядра?

- А.  $13,67 \frac{\text{МэВ}}{\text{нукл}}$      Б.  $9,11 \frac{\text{МэВ}}{\text{нукл}}$   
 В.  $5,47 \frac{\text{МэВ}}{\text{нукл}}$      Г.  $54,68 \frac{\text{МэВ}}{\text{нукл}}$   
 Д.  $136,7 \frac{\text{МэВ}}{\text{нукл}}$

9. Для вычисления энергии связи ядра в СИ по формуле  $E_{\text{св}} = \Delta mc^2$  в каких единицах нужно выразить значение дефекта массы  $\Delta m$  ядра?

- А. В атомных единицах массы (а. е. м.).  
 Б. В мегаэлектронвольтах (МэВ).  
 В. В миллиграммах.  
 Г. В граммах.  
 Д. В килограммах.

10. Удельная энергия связи нуклонов в ядре, содержащем три протона и четыре нейтрона, равна  $5,6 \frac{\text{МэВ}}{\text{нукл}}$ . Каково минимальное значение энергии, необходимое для полного разделения этого ядра на свободные нейтроны и протоны?

- А. 5,6 МэВ.     Б. 39,2 МэВ.  
 В. 16,8 МэВ.     Г. 24,4 МэВ.  
 Д. 0,8 МэВ.

### Тест №5 (уровень Б)

1. Если сблизать на расстояние действия ядерных сил пары частиц протон-протон ( $p-p$ ), протон-нейтрон ( $p-n$ ) и нейтрон-нейтрон ( $n-n$ ), то в каких парах обнаружится действие ядерных сил притяжения?

- А. Только в паре  $p-p$ .  
 Б. Только в паре  $p-n$ .  
 В. Только в паре  $n-n$ .  
 Г. В парах  $p-n$  и  $n-n$ .  
 Д. В парах  $p-p$ ,  $p-n$  и  $n-n$ .

2. Обнаружено, что ядерные силы обладают свойством насыщения. Что значит это утверждение?

- А. Что один нуклон в ядре может одновременно вступать в ядерное взаимодействие лишь с небольшим числом соседних с ним нуклонов.  
 Б. Что один нуклон в ядре может одновременно взаимодействовать ядерными силами со всеми остальными нуклонами в ядре.  
 В. Что ядерные силы быстро убывают с расстоянием.  
 Г. Что ядерные силы не зависят от расстояния.  
 Д. Что ядерные силы не зависят от наличия электрического заряда у нуклона.

3. Ядерные силы называют силами обменного типа. Чем обмениваются между собой нуклоны в атомном ядре?

- А. Протонами.  
 Б. Нейтронами.  
 В. Электронами.  
 Г. Фотонами.  
 Д. Пионами.

4. Каков спектр энергетических состояний атомного ядра и какие частицы испускает ядро при переходе из возбужденного состояния в нормальное?

- А. Спектр состояний линейчатый, испускает гамма-кванты.  
 Б. Спектр состояний линейчатый, испускает бета-частицы.  
 В. Спектр состояний линейчатый, испускает бета-частицы.  
 Г. Спектр состояний линейчатый, испускать может альфа-частицы, бета-частицы и гамма-кванты.  
 Д. Спектр состояний сплошной, испускать может альфа-частицы, бета-частицы и гамма-кванты.

5. Атомное ядро с зарядовым числом  $Z$ , массовым числом  $A$  и числом нейтронов  $N$  испытало альфа-распад. Каковы значения зарядового числа, массового числа и числа нейтронов у ядра-продукта альфа-распада?

- А.  $Z-2, A, N-2$ .
- Б.  $Z-2, A-2, N-2$ .
- В.  $Z-2, A-4, N-2$ .
- Г.  $Z-1, A, N+1$ .
- Д.  $Z+1, A, N-1$ .
6. Атомное ядро с зарядовым числом  $Z$ , массовым числом  $A$  и числом нейтронов  $N$  испытало электронный бета-распад. Каковы значения зарядового числа, массового числа и числа нейтронов у ядра-продукта бета-распада?
- А.  $Z-2, A, N-2$ .
- Б.  $Z-2, A-2, N-2$ .
- В.  $Z-2, A-4, N-2$ .
- Г.  $Z-1, A, N+1$ .
- Д.  $Z+1, A, N-1$ .
7. Атомное ядро с зарядовым числом  $Z$ , массовым числом  $A$  и числом нейтронов  $N$  испытало позитронный бета-распад. Каковы значения зарядового числа, массового числа и числа нейтронов у ядра-продукта бета-распада?
- А.  $Z-2, A, N-2$ .
- Б.  $Z-2, A-2, N-2$ .
- В.  $Z-2, A-4, N-2$ .
- Г.  $Z-1, A, N+1$ .
- Д.  $Z+1, A, N-1$ .
8. При каком условии возможен самопроизвольный альфа-распад ядра изотопа  ${}^A_ZX$ ?
- А. При сообщении ядру избытка энергии извне.
- Б. Если масса ядра изотопа  ${}^A_ZX$  больше суммы масс ядра изотопа  ${}^{A-4}_{Z-2}X$  и ядра гелия  ${}^4_2\text{He}$ .
- В. Если масса ядра изотопа  ${}^A_ZX$  меньше суммы масс ядра изотопа  ${}^{A-4}_{Z-2}X$  и ядра гелия  ${}^4_2\text{He}$ .
- Г. Если масса ядра изотопа  ${}^A_ZX$  больше суммы масс ядра изотопа  ${}^{A-2}_{Z-4}X$  и ядра гелия  ${}^4_2\text{He}$ .
- Д. Если масса ядра изотопа  ${}^A_ZX$  меньше суммы масс ядра изотопа  ${}^{A-2}_{Z-4}X$  и ядра гелия  ${}^4_2\text{He}$ .
9. При каком условии возможен самопроизвольный электронный бета-распад ядра изотопа  ${}^A_ZX$ ?
- А. При сообщении ядру избытка энергии извне.
- Б. Если масса ядра изотопа  ${}^A_ZX$  больше суммы масс ядра изотопа  ${}^A_{Z-1}Y$  и электрона.
- В. Если масса ядра изотопа  ${}^A_ZX$  меньше суммы масс ядра изотопа  ${}^A_{Z-1}Y$  и электрона.
- Г. Если масса ядра изотопа  ${}^A_ZX$  больше суммы масс ядра изотопа  ${}^A_{Z+1}Y$  и электрона.
- Д. Если масса ядра изотопа  ${}^A_ZX$  меньше суммы масс ядра изотопа  ${}^A_{Z+1}Y$  и электрона.
10. При каком условии возможен самопроизвольный позитронный бета-распад ядра изотопа  ${}^A_ZX$ ?
- А. При сообщении ядру избытка энергии извне.
- Б. Если масса ядра изотопа  ${}^A_ZX$  больше суммы масс ядра изотопа  ${}^A_{Z-1}Y$  и позитрона.
- В. Если масса ядра изотопа  ${}^A_ZX$  меньше суммы масс ядра изотопа  ${}^A_{Z-1}Y$  и позитрона.
- Г. Если масса ядра изотопа  ${}^A_ZX$  больше суммы масс ядра изотопа  ${}^A_{Z+1}Y$  и позитрона.
- Д. Если масса ядра изотопа  ${}^A_ZX$  меньше суммы масс ядра изотопа  ${}^A_{Z+1}Y$  и позитрона.

*Самостоятельная  
работа*

### Самостоятельная работа №4 (уровень Б)

При вычислении выделяемой или поглощаемой энергии в ядерных процессах удобно пользоваться переводом дефекта массы  $\Delta m$ , выраженного в атом-

ных единицах массы, в энергию в мегаэлектронвольтах. Найдём значение коэффициента перевода:

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

$$\Delta m = 1 \text{ а.е.м.} \approx 1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$c = 299792458 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\Delta E = 1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \left(299792458 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2 \approx$$

$$\approx 1,4924 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}$$

$$1 \text{ эВ} \approx 1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$\frac{1,4924 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}}{1,60217733 \cdot 10^{-19} \frac{\text{Дж}}{\text{эВ}}} \approx 931,5 \cdot 10^6 \text{ эВ} = 931,5 \text{ МэВ}$$

Мы получили, что изменение массы взаимодействующей системы частиц на одну атомную единицу массы сопровождается выделением или поглощением энергии 931,5 МэВ. В этом смысле можно записать равенство:

$$1 \text{ а.е.м.} = 931,5 \text{ МэВ.}$$

Для нахождения изменения энергии  $\Delta E$  системы в ядерных процессах в мегаэлектронвольтах достаточно определить изменение массы  $\Delta m$  системы в атомных единицах массы и умножить его на переводной коэффициент  $931,5 \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}}$ .

$$\Delta E = \Delta m_{\text{а.е.м.}} \cdot 931,5 \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}}$$

### Задача

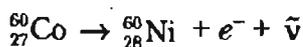
Используя сведения из таблицы 4.1 о массе ядер изотопов кобальта  ${}^{60}_{27}\text{Co}$  и никеля  ${}^{60}_{28}\text{Ni}$ , определите, возможен ли самопроизвольный электронный бета-распад ядра кобальта  ${}^{60}_{27}\text{Co}$ ? Если такой распад возможен, определите выделяющуюся при распаде энергию.

### Решение.

При электронном бета-распаде ядра изотопа кобальта  ${}^{60}_{27}\text{Co}$  должно произойти превращение

Таблица 4.1

Атомный номер	Название элемента	Символ изотопа	Масса атомного ядра изотопа, а.е.м.
0	нейтрон	$n$	1,008665
1	водород	${}^1_1\text{H}$	1,007276
1	дейтерий	${}^2_1\text{H}$	2,013553
1	тритий	${}^3_1\text{H}$	3,015500
2	гелий	${}^3_2\text{He}$	3,014932
2	гелий	${}^4_2\text{He}$	4,001506
3	литий	${}^6_3\text{Li}$	6,013477
5	бор	${}^{10}_5\text{B}$	10,010195
6	углерод	${}^{12}_6\text{C}$	11,996708
6	углерод	${}^{14}_6\text{C}$	13,999950
7	азот	${}^{14}_7\text{N}$	13,999234
13	алюминий	${}^{27}_{13}\text{Al}$	26,974409
15	фосфор	${}^{30}_{15}\text{P}$	29,970081
18	аргон	${}^{40}_{18}\text{Ar}$	39,952508
19	калий	${}^{40}_{19}\text{K}$	39,953577
20	кальций	${}^{40}_{20}\text{Ca}$	39,951619
27	кобальт	${}^{60}_{27}\text{Co}$	59,919008
28	никель	${}^{60}_{28}\text{Ni}$	59,915428
82	свинец	${}^{206}_{82}\text{Pb}$	205,929475
84	полоний	${}^{210}_{84}\text{Po}$	209,936778
90	торий	${}^{234}_{90}\text{Th}$	233,994209
92	уран	${}^{238}_{92}\text{U}$	238,000315
масса электрона, $m_e = 0,0005486$ а.е.м.			



Такое превращение возможно лишь в том случае, если масса ядра  ${}_{27}^{60}\text{Co}$  больше суммы масс ядра  ${}_{28}^{60}\text{Ni}$  и электрона.

Сумма масс ядра никеля  ${}_{28}^{60}\text{Ni}$  и электрона равна  $m_{\text{Ni}} + m_e \approx 59,915428$  а.е.м. +  $0,0005486$  а.е.м.  $\approx 59,915977$  а.е.м.

Сумма масс ядра никеля и электрона меньше массы ядра кобальта  $m_{\text{Co}}$

$$m_{\text{Co}} \approx 59,9190078 \text{ а.е.м.}$$

следовательно самопроизвольный электронный бета-распад ядра кобальта  ${}_{27}^{60}\text{Co}$  возможен.

Вычислим изменение массы  $\Delta m$  в этом процессе:

$$\Delta m = m_{\text{Co}} - m_{\text{Ni}} - m_e = 59,9190078 \text{ а.е.м.} - 59,915977 \text{ а.е.м.} = 0,003031 \text{ а.е.м.}$$

Выделение энергии при бета-распаде равно:

$$\Delta E = 0,003031 \text{ а.е.м.} \cdot 931,5 \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}} \approx 2,82 \text{ МэВ.}$$

Используя таблицу 4.1, вычислите энергию связи  $E_{\text{св}}$  ядер и удельную энергию связи  $\frac{E_{\text{св}}}{A}$  нуклонов в ядрах:

1.  ${}^4_2\text{He}$ .
2.  ${}^6_3\text{Li}$ .

Используя таблицу 4.1, определите, возможны ли самопроизвольные радиоактивные превращения, представленные ниже. Если такие превращения возможны, вычислите энергию, освобождающуюся при радиоактивном распаде.

3.  ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + e^{-} + \bar{\nu}$
4.  ${}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^4_2\text{He}$
5.  ${}^{40}_{18}\text{Ar} \rightarrow {}^{40}_{19}\text{K} + e^{-} + \bar{\nu}$
6.  ${}^{40}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{40}_{18}\text{Ar} + e^{+} + \nu$
7.  ${}^{40}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{40}_{20}\text{Ca} + e^{-} + \bar{\nu}$
8.  ${}^{60}_{28}\text{Ni} \rightarrow {}^{60}_{27}\text{Co} + e^{+} + \nu$
9.  ${}^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{206}_{82}\text{Pb} + {}^4_2\text{He}$
10.  ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$

*Для тех,*

*кому стало интересно*

## Как делают научные открытия (уровень В)

### Открытие протона и нейтрона

*Открытия охотнее приходят туда, где их ждут*

После открытия атомного ядра, измерения его радиуса, заряда и массы естественно возникает вопрос о строении ядра. Различия атомных ядер по количеству элементарных электрических зарядов позволяют предположить, что сами атомные ядра состоят из каких-то еще более мелких частиц, каждая из которых обладает элементарным положительным зарядом.

Естественным кандидатом на роль «строительного кирпича» для атомных ядер было ядро самого легкого изотопа водорода, обладающее элементарным положительным электрическим зарядом и самой малой массой среди всех атомных ядер. Но одно дело предполагать, другое дело доказать.

Резерфорд доказал, что в ядрах различных атомов содержатся частицы, тождественные по свойствам с ядром атома самого легкого изотопа водорода. В 1919 году он исследовал прохождение альфа-частиц через газообразный азот и обнаружил, что в результате столкновений альфа-частиц с ядрами атомов азота появляются быстро движущиеся частицы, обладающие элементарным положительным электрическим зарядом. Масса этих частиц оказалась равной массе ядра атома водорода.

Дальнейшие исследования показали, что при ударах альфа-частиц такие же частицы освобождаются из ядер атомов бора, фтора, натрия, алюминия, фосфора и ряда других химических элементов. Эти частицы назвали **протонами**.

С открытием протона проблема состава атомных ядер не была решена полностью. Если бы атомные ядра состояли только из протонов, то у всех ядер зарядовое число  $Z$  было бы равно массовому числу  $A$ . Но у всех изотопов всех химических элементов, кроме самого легкого изотопа водорода, зарядовое число  $Z$  отличается от массового числа  $A$ . Этот факт ясно показывает, что атомные ядра состоят не только из протонов. Они содержат какие-то еще частицы. Резерфорд в 1920 году высказал

предположение, что внутри атомных ядер могут находиться нейтральные частицы с массой, примерно равной массе протона. Эти гипотетические частицы он назвал **нейтронами**.

Однако попытки Резерфорда и его сотрудников экспериментально обнаружить нейтрон долгое время были безуспешными. Нейтрон сначала предоставил возможность сделать открытие немецким физикам В. Боте и Г. Беккеру. В 1930 году они обнаружили, что при облучении бериллия и лития альфа-частицами возникает какое-то новое излучение неизвестной природы. Это излучение слабо взаимодействовало с веществом и проходило через толстые слои свинца с меньшим ослаблением, чем гамма-кванты или рентгеновское излучение.

Боте и Беккер открыли новое явление, но не смогли разгадать природу открытого излучения. Они не думали о возможности существования такой частицы, не ждали ее появления.

Исследования нового типа проникающего излучения продолжили французы Фредерик и Ирен Жолио-Кюри (Ирен Жолио-Кюри — дочь Марии Склодовской-Кюри).

В 1932 году они установили, что излучение, возникающее при облучении бериллиевой пластины альфа-частицами, способно выбивать из парафина протоны.

Но что собой представляет это проникающее излучение, и они не разгадали.

Завершающий эксперимент был выполнен в том же 1932 году англичанином Дж. Чедвиком. Он измерил энергию и импульс протонов, выбиваемых неизвестным излучением, и показал, что такие значения энергии и импульса могут быть переданы частицами с массой, примерно равной массе протона. Слабое поглощение нового вида излучения в веществе показывало, что эти частицы не обладают электрическим зарядом. Следовательно, это и есть предсказанные Резерфордом нейтроны.

Почему же Чедвик, в отличие от своих предшественников, сразу «узнал» нейтроны? По той простой причине, что он работал в лаборатории Резерфорда, где ждали их обнаружения и догадывались, какими свойствами должны обладать нейтроны.

За открытие нейтрона Дж. Чедвик был удостоен Нобелевской премии по физике, Фредерик и Ирен Жолио-Кюри в этой истории упустили свою первую возможную Нобелевскую премию.



### Изучив эту тему,

- ♦ вы узнаете, что такое ядерные реакции;
- ♦ поймете, как энергия ядерной реакции может быть использована в практических целях;
- ♦ научитесь вычислять энергию, освобождающуюся при осуществлении ядерных реакций

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

### Ядерные реакции (уровень А)

Ядерной реакцией называется превращение одного атомного ядра в другое атомное ядро в результате его взаимодействия с какой-либо частицей. Частицей, способной вызвать ядерное превращение, может быть протон, нейтрон, гамма-квант или любое атомное ядро. Условно ядерная реакция записывается в форме  $A(a, b) B$  или  $A + a \rightarrow B + b$ ,

где:  $A$  — исходное ядро;

$a$  — частица, вызывающая ядерную реакцию;

$B$  — ядро-продукт реакции;

$b$  — частица (или частицы), испускаемые при осуществлении реакции.

### Основные понятия:

- ♦ Выход ядерной реакции
- ♦ Цепная ядерная реакция
- ♦ Замедление нейтронов
- ♦ Ядерный реактор
- ♦ Тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ)
- ♦ Замедлитель нейтронов
- ♦ Теплоноситель
- ♦ Управляющие стержни
- ♦ Активная зона
- ♦ Отражатель
- ♦ Защита
- ♦ Элементарные частицы
- ♦ Античастицы
- ♦ Аннигиляция
- ♦ Кварк
- ♦ Цвет кварка
- ♦ Глюон

Все атомные ядра в природе являются продуктами ядерных реакций, осуществленных на разных стадиях развития Вселенной. Искусственно ядерную реакцию впервые осуществил Резерфорд в 1919 г. Облучая альфа-частицами ядра азота, он обнаружил превращения ядер атомов азота в ядра атомов кислорода с испусканием протонов (рис. 69).

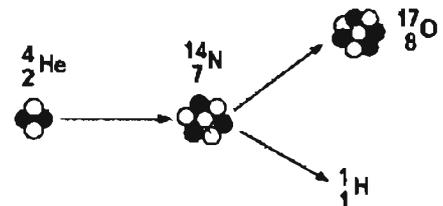
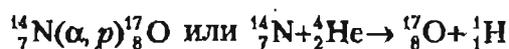


Рис. 69



В ядра с большим числом  $Z$  протонов альфа-частицы не могут проникнуть из-за действия кулоновских сил отталкивания.

С помощью нейтронов ядерные реакции осуществляются при любых значениях их энергии, так как кулоновские силы не препятствуют проникновению нейтронов в атомные ядра.

При любых ядерных реакциях выполняются законы сохранения энергии, импульса, момента импульса, электрического заряда.

Закон сохранения электрического заряда при осуществлении ядерных реакций можно рассматривать в форме закона сохранения зарядового числа  $Z$ . При осуществлении ядерных реакций сохраняется также суммарное значение массового числа  $A$ .

Ядерные реакции бывают с выделением энергии или с поглощением энергии. Выделение или поглощение энергии при осуществлении ядерной реакции можно определить, вычислив разность  $\Delta m$  масс частиц, вступающих в реакцию и масс продуктов реакции:

$$\Delta m = m_A + m_a - (m_B + m_b) \quad (5.1)$$

Если эта разность  $\Delta m$  положительна, то полная энергия масс покоя системы уменьшилась и произошло выделение энергии  $\Delta E$ :

$$\Delta E = \Delta mc^2.$$

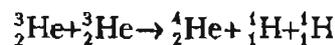
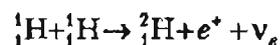
Эта энергия называется **выходом ядерной реакции**.

Если же разность  $\Delta m$  отрицательна, в реакции произошло поглощение энергии  $\Delta E$ .

**Реакциями синтеза** называют ядерные реакции, в результате которых из нескольких атомных ядер в результате их соединения возникает атомное ядро с большим массовым числом.

Для осуществления синтеза ядра гелия из двух ядер водорода нужно лишь сблизить их на расстояние радиуса действия ядерных сил. Из-за действия кулоновских сил отталкивания такое сближение возможно лишь при достаточно больших значениях кинетической энергии ядер. Увеличить кинетическую энергию ядер можно нагреванием вещества. Ядерные реакции синтеза, осуществляемые в результате столкновений ядер при высокой температуре, называются **термоядерными реакциями синтеза**.

Образование ядер гелия из ядер водорода в недрах Солнца при температуре  $\sim 15 \cdot 10^6$  К происходит в результате осуществления термоядерных реакций синтеза:

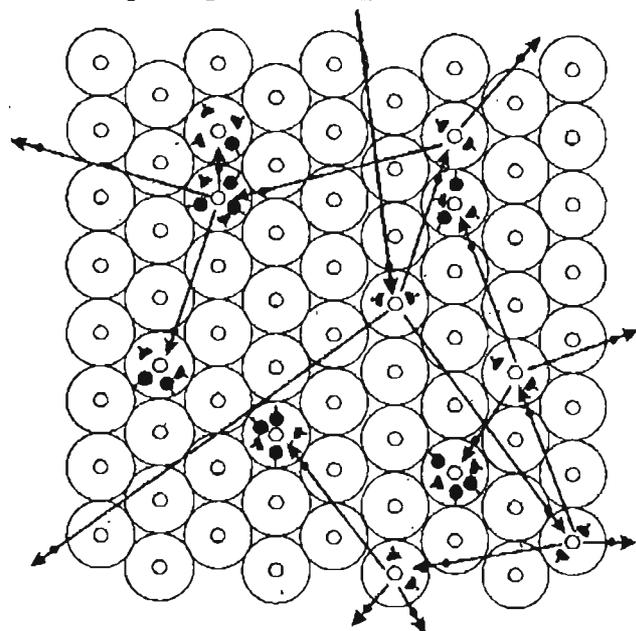


Первая реакция деления была открыта при облучении ядер урана нейтронами. Оказалось, что ядро урана после захвата нейтрона делится на две или три части и, кроме того, происходит освобождение двух или трех нейтронов (рис. 70).



Рис. 70

Освобожденные нейтроны при выполнении определенных условий могут попасть в другие ядра урана и вызвать их деление с освобождением 7–9 новых нейтронов и так далее, процесс может лавинообразно нарастать. Такой процесс называется **цепной ядерной реакцией** (рис. 71).



○ — ядро урана      ◀ ▶ — осколки ядра урана  
● — нейтрон

Рис. 71

При делении одного ядра урана освобождается энергия около 200 МэВ. Большая часть этой энергии

выделяется в форме кинетической энергии продуктов деления ядра урана, которые называют ядрами-осколками. Ядра-осколки приобретают кинетическую энергию под действием кулоновских сил отталкивания после разрыва ядерных связей.

### Использование ядерной энергии (уровень А)

Выход реакции деления ядра урана (~200 МэВ) в сотни миллионов раз превосходит выход химических реакций на один акт реакции, поэтому велись настойчивые поиски путей применения цепных реакций деления ядер урана для практических целей. Прежде всего выяснилось, что нейтроны, освобождающиеся при делении ядер урана, поглощаются ядрами любого изотопа урана, но вызывают деление только ядер изотопа урана с массовым числом 235. Цепная реакция деления в природном уране в обычных условиях не развивается, так как ядер урана 238, поглощающих нейтроны без деления и выброса новых нейтронов, в 140 раз больше ядер урана 235. Для того чтобы цепная реакция могла осуществиться в природном уране, нейтроны, освобождающиеся при делении ядер урана 235 с энергией в 1–2 МэВ, замедляют до тепловых скоростей. Медленные нейтроны примерно в 500 раз более эффективно захватываются ядрами урана 235, чем ядрами урана 238. Поэтому цепная реакция на медленных нейтронах может происходить и в природном уране.

Управляемая цепная реакция деления ядер осуществляется в **ядерном реакторе** (рис. 72).

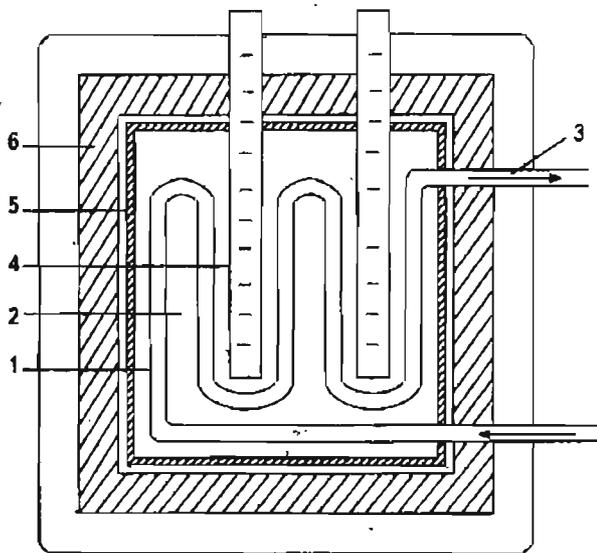


Рис. 72

В ядерном реакторе на медленных нейтронах ядерным горючим может служить природный уран. Ядерное горючее помещается в металлические трубки, называемые **тепловыделяющими элементами (ТВЭЛ)** — (1). Для замедления нейтронов трубки ТВЭЛ'ов помещаются внутрь вещества, служащего **замедлителем нейтронов** (2). Замедление нейтронов происходит в результате их упругих столкновений с ядрами вещества-замедлителя. В качестве замедлителя могут использоваться графит, обычная вода, тяжелая вода.

При осуществлении цепной реакции уран и стенки трубок тепловыделяющих элементов нагреваются. Через трубки ТВЭЛ'ов непрерывно под большим давлением прокачивается вода или другое вещество и отводит из них выделяющееся тепло. Вещество, отводящее тепло из ТВЭЛ'ов, называется **теплоносителем** (3).

Для управления цепной реакцией в реакторе используются **управляющие стержни** (4), содержащие значительное количество бора или кадмия. Ядра атомов бора и кадмия обладают способностью очень эффективно поглощать медленные нейтроны. Поэтому введение управляющих стержней в активную зону реактора уменьшает число нейтронов, способных участвовать в цепной реакции деления, а выведение стержней ведет к возрастанию числа нейтронов и увеличению мощности, выделяющейся в реакторе. Необходимые изменения положения управляющих стержней производятся автоматами, поддерживающими заданный уровень выделяющейся мощности в реакторе.

Пространство, в котором находятся ядерное горючее в тепловыводящих стержнях, замедлитель, теплоноситель и управляющие стержни, называется **активной зоной реактора**. В активной зоне реактора осуществляется цепная ядерная реакция. Активная зона окружается **отражателем** (5) — слоем вещества, ядра которого хорошо отражают нейтроны, возвращая их в активную зону. За отражателем нейтронов располагаются стенки (6) из материалов, хорошо поглощающих гамма-излучение и нейтроны, для **защиты** людей от ионизирующих излучений, возникающих в активной зоне реактора.

На атомных электростанциях тепло, выводимое теплоносителем из активной зоны реактора, расходуется на превращение воды в пар под высоким давлением. Пар вращает паровую турбину, соеди-

ненную с ротором электрического генератора, генератор производит электроэнергию.

Использование ядерной энергии, получаемой в процессе цепной реакции деления тяжелых ядер, не имеет перспектив на длительные сроки, так как запасы урана и тория в экономически приемлемых для разработки месторождениях довольно ограничены. Кроме того, ядерная энергетика на основе использования процесса деления тяжелых ядер сопряжена с трудной проблемой удаления и хранения большого количества радиоактивных отходов, опасных для людей.

Практически неограниченным источником энергии могут в принципе служить ядерные реакции синтеза легких ядер, в первую очередь ядер гелия из ядер водорода.

При синтезе 1 грамма гелия из водорода выделяется энергия  $4,2 \cdot 10^{11}$  Дж. Для получения такого количества энергии нужно сжечь 10 тонн дизельного топлива. Для термоядерного синтеза ядер гелия  ${}^4\text{He}$  из легкого изотопа водорода  ${}^1\text{H}$  необходимо нагреть водород до температуры  $10^8$  К, для синтеза гелия из тяжелых изотопов водорода дейтерия  ${}^2\text{H}$  и трития  ${}^3\text{H}$  нужно нагреть водород до  $5 \cdot 10^7$  К. Чтобы оценить степень трудности задачи, нужно обратить внимание, что эти значения температуры выше температуры в недрах Солнца.

Для использования энергии термоядерного синтеза в мирных целях исследуется возможность нагревания водорода в кольцевой камере пропусканием через него электрического разряда, нагревания небольших порций водорода мощными пучками света от лазеров или электронными пучками.

### Элементарные частицы (уровень В)

Представление об атомах как мельчайших неизменных частицах вещества использовалось в науке более двух тысяч лет. Открытие электрона, протона и нейтрона как составных частей любого атома и открытие явления радиоактивного распада с превращением атомов одного химического элемента в атомы другого химического элемента опровергли гипотезу о неизменности и неделимости атомов. Однако, обнаружение сложного состава атомов и способности их к различным превращениям не опровергает гипотезы о возможности существования в природе самых простых, самых маленьких частиц, не состоящих из каких-либо более мелких частей.

Электрон, протон и нейтрон некоторое время воспринимались учеными как именно такие самые последние, простейшие и неизменные частицы, из которых построен весь мир, поэтому их называли **элементарными частицами**.

В действительности мир оказался сложнее и многообразнее и к трем открытым элементарным частицам одна за другой стали добавляться все новые и новые частицы с различными значениями массы, электрического заряда, спина. Их, как и первые три, продолжали называть элементарными частицами.

В 1928 году Поль Дирак предсказал возможность существования частицы с массой электрона, но с положительным зарядом. Такая частица была обнаружена экспериментально в 1932 году и ей дали названием **позитрон**. Электрон и позитрон оказались не просто двумя разноименными заряженными частицами, но **античастицами** по отношению друг к другу. Любые две античастицы обладают противоположными зарядами и одинаковыми массами. При встрече две античастицы **аннигилируют**, то есть исчезают как частицы. Вместо двух античастиц возникают гамма-кванты с энергией, равной суммарной энергии аннигилировавших частиц (рис. 73).

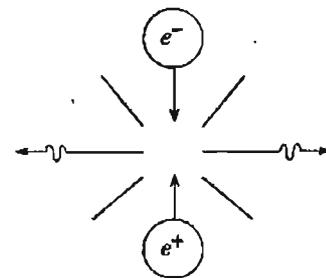


Рис. 73

Каждой частице с полуцелым спином соответствует своя античастица. Нейтральные частицы с целым или нулевым спином могут не иметь античастиц.

Антипротоны с антиэлектронами (позитронами) могут образовывать атомы антиводорода. Точно так же во Вселенной могут существовать атомы любого другого антивещества. При встрече вещества с антивеществом освобождается самое большое из возможных количество энергии на единицу массы:  $E = 2mc^2$ . При аннигиляции 1 кг вещества с 1 кг антивещества выделение энергии равно:

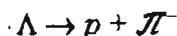
$$E = 2 \text{ кг} \left( 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)^2 = 1,8 \cdot 10^{17} \text{ Дж.}$$

Это примерно в 6 миллиардов раз больше энергии, освобождающейся при сжигании 1 кг химического топлива.

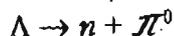
Среди сотен открытых элементарных частиц лишь шесть оказались стабильными. Эти частицы – фотон  $\gamma$ , электрон  $e^-$ , протон  $p$  и три различных нейтрино, электронное  $\nu_e$ , мюонное  $\nu_\mu$  и тау-нейтрино  $\nu_\tau$ . Остальные «элементарные частицы» через очень короткое время после рождения самопроизвольно распадаются на другие частицы до превращения в какие-либо из шести стабильных элементарных частиц. По этой причине многие из частиц, называемых элементарными частицами, можно рассматривать как возбужденные состояния стабильных элементарных частиц.

Например, группу элементарных частиц, называемых гиперонами, можно рассматривать как возбужденные состояния протона и нейтрона. Превращение гиперона в протон или нейтрон происходит за время порядка  $10^{-10} - 10^{-20}$  с испусканием пи-мезона.

Например, лямбда-гиперон  $\Lambda$  может превратиться в протон  $p$  и отрицательный пи-мезон  $\pi^-$

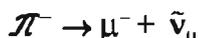
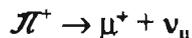


или в нейтрон  $n$  и нейтральный пи-мезон  $\pi^0$ .



Энергетическая диаграмма возбужденных состояний протона и нейтрона в виде гиперонов различного типа и некоторые из их возможных превращений с испусканием пи-мезонов представлены на рисунке 74. Пи-мезоны в этих превращениях играют такую же роль, какую фотоны играют при переходах атомов из возбужденных состояний в основное состояние.

Сами пи-мезоны являются нестабильными частицами и в среднем за время  $2,6 \cdot 10^{-8}$  с распадаются на мюоны  $\mu$  и мюонное нейтрино  $\nu_\mu$



Мюоны в свою очередь со средним временем жизни  $2,2 \cdot 10^{-6}$  с превращаются в электрон или позитрон с испусканием двух нейтрино:

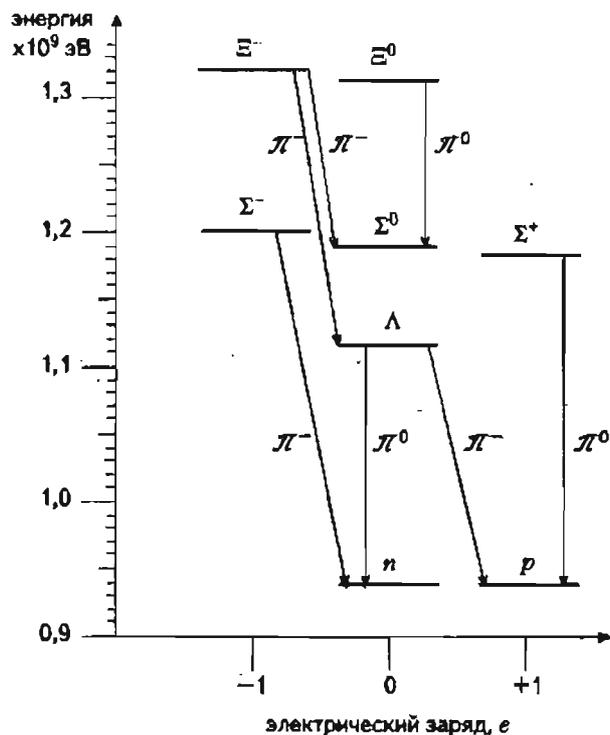
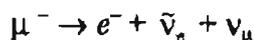
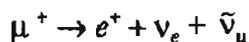


Рис. 74

Если протон и нейтрон могут иметь различные возбужденные состояния в виде гиперонов, то можно предположить, что сами эти частицы не являются «настоящими элементарными частицами», а состоят из каких-то еще меньших частиц. Такое предположение убедительно подтверждается результатами опытов по изучению рассеяния очень быстрых электронов на протонах и нейтронах. В этих опытах было обнаружено, что большая часть электронов проходит сквозь протоны и нейтроны, не испытывая существенных отклонений, а небольшая часть из них сильно рассеивается на каких-то нескольких центрах (рис. 75).

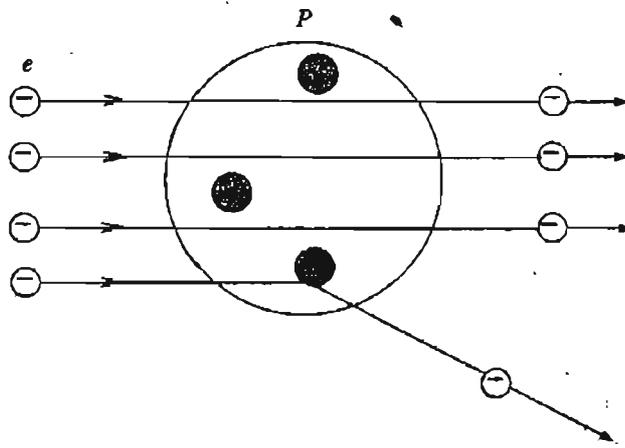


Рис. 75

Частицы, из которых построены протон, нейтрон, гипероны и мезоны, назвали **кварками**. По современным представлениям в природе существует шесть видов кварков. Их обозначают буквами  $u, d, s, c, b, t$ . Каждый кварк может обладать одним из трех видов особого заряда, которые назвали **цветами кварков** – синим, красным и желтым.

С учетом различия цветового заряда получается уже 18 различных кварков. А так как у каждого кварка есть свой антикварк, то общее их число равно 36.

Протон и нейтрон состоят из трех кварков:  $p = (uud)$ ,  $n = (udd)$ , антипротон и антинейтрон – из трех антикварков (рис. 76).

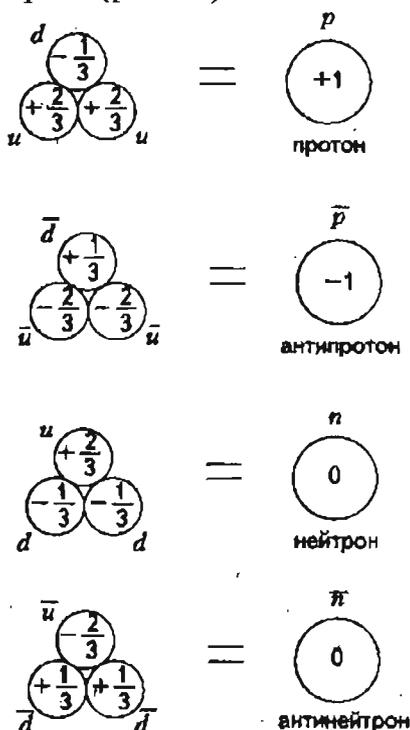


Рис. 76

«Цветовые заряды» протона и нейтрона равны нулю, так как они состоят из трех кварков с разными «цветами». Это дает в сумме нулевой «цвет» подобно тому, как смешение красного, синего и зеленого света дает белый или «бесцветный» свет.

Каждый мезон состоит из одного кварка и одного антикварка с противоположными цветовыми зарядами и так же в сумме не имеет «цвета». Например,  $\pi^+ = (u\bar{d})$ ,  $\pi^- = (\bar{u}d)$ .

Неожиданной особенностью кварков являются значения их электрического заряда. Кварки  $u, c, t$

обладают электрическим зарядом  $+\frac{2}{3}e$ , кварки  $d, s, b$  имеют электрический заряд  $-\frac{1}{3}e$ .

Образуя частицы, кварки соединяются только в такие пары или тройки, в которых электрический заряд имеет целое число элементарных зарядов  $e$  или нулевой электрический заряд. Образование элементарной частицы с электрическим зарядом в два элементарных заряда оказывается возможным при соединении трех кварков с зарядом  $+\frac{2}{3}e$ . Примером такой частицы является дельта два плюс гиперон  $\Delta^{++} = (uuu)$ .

Еще одной удивительной особенностью кварков оказалась невозможность разделения элементарных частиц на составляющие их кварки. При столкновениях протонов и нейтронов с очень высокими энергиями происходит рождение большого числа пар кварк-антикварк, но свободные кварки не появляются.

Этот факт может иметь следующее объяснение. Между кварками действуют силы притяжения, которые не убывают с расстоянием. В таком случае потенциальная энергия кварков при попытке их разъединения увеличивается прямо пропорционально расстоянию и для разрыва связи необходима бесконечная энергия. Наглядно представить такое взаимодействие можно следующим образом. Силовые линии электрического поля расходятся в пространстве, число этих линий на единицу площади убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, поэтому и сила кулоновского взаимодействия между зарядами убывает обратно пропорционально квадрату расстояния (рис. 77).

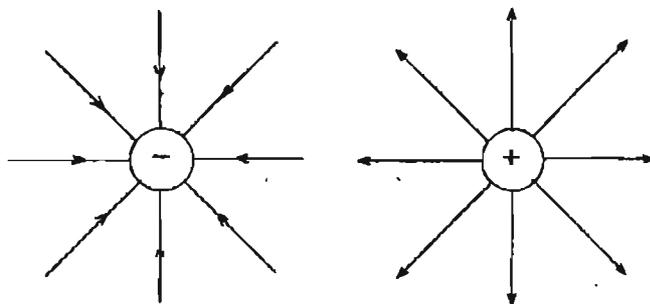


Рис. 77

Силовые линии поля цветовых зарядов кварков при их удалении друг от друга собираются в па-

Таблица 5.1. Фундаментальные элементарные частицы

		Кварки		Лептоны	
		Кварк <i>u</i>	Кварк <i>d</i>	Электрон <i>e</i>	Электронное нейтрино $\nu_e$
		Кварк <i>s</i>	Кварк <i>s</i>	Мюон $\mu$	Мюонное нейтрино $\nu_\mu$
		Кварк <i>t</i>	Кварк <i>b</i>	Таон $\tau$	Таонное нейтрино $\nu_\tau$
Электрический заряд		$+\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$-e$	0
Виды взаимодействия	Сильное	+	+	-	-
	Электромагнитное	+	+	+	-
	Слабое	+	+	+	+
	Гравитационное	+	+	+	+

Таблица 5.2. Фундаментальные взаимодействия

Вид взаимодействия	Взаимодействующие частицы	Радиус действия сил	Относительная сила взаимодействия	Частицы-носители взаимодействия
Сильное	Кварки Нуклоны	$10^{-15}$ м	1	Глюоны Мезоны
Электромагнитное	Частицы с электрическими зарядами	$\infty$	$10^{-2}$	Фотоны
Слабое	Кварки Лептоны	$10^{-17}$ м	$10^{-3}$	Промежуточные бозоны
Гравитационное	Все частицы	$\infty$	$10^{-39}$	Гравитоны (?)

параллельный пучок, число силовых линий на единицу площади с удалением не изменяется, не изменяется и сила цветового взаимодействия (рис. 78).



Рис. 78

Между элементарными частицами могут осуществляться **четыре различных типа взаимодействия** — гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое взаимодействие. **Гравитационное взаимодействие** осуществляется между любыми частицами. **Электромагнитное взаимодействие** осуществляется между частицами с электрическими зарядами. **Сильным взаимодействием** называется взаимодействие между цветовыми зарядами кварков. **Слабым взаимодействием** называется взаимодействие с участием частиц нейтрино.

Каждый тип взаимодействия осуществляется с помощью квантов соответствующего поля. Не обнаруженные пока экспериментально кванты гравитационного поля называют **гравитонами**, квант электромагнитного поля — **фотон**. Кванты поля сильного взаимодействия назвали **глюонами**. Обмен глюонами связывает кварки внутри протона и нейтрона. Связь протонов и нейтронов в ядре происходит путем обмена пи-мезонами, состоящими из кварков, следовательно и ядерные силы есть результат сильного взаимодействия цветовых зарядов кварков в протонах и нейтронах.

Для объяснения взаимодействия всех кварков и антикварков трех различных цветов и антицветов теория предсказывает существование восьми различных глюонов.

Носителями слабого взаимодействия являются частицы, называемые промежуточными бозонами  $W$  и  $Z$ .

К настоящему времени на роль «настоящих элементарных частиц», то есть частиц, не построенных из каких-то других частиц, претендуют шесть легких частиц, называемых лептонами, и шесть кварков. Эти частицы называют **фундаментальными элементарными частицами**.

Правда, у каждой из этих частиц имеются своя античастица, да еще каждый кварк и антикварк имеются в трех разных по «цвету» вариантах. Да еще имеются кванты каждого из четырех полей, с помощью которых частицы взаимодействуют друг с другом.

Сведения о фундаментальных элементарных частицах представлены в таблице 5.1. Наличие данного взаимодействия отмечено знаком плюс (+), отсутствие — знаком (-).

Сведения о четырех типах фундаментальных взаимодействий в частицах, осуществляющих эти взаимодействия, представлены в таблице 5.2.

В четвертом столбце таблицы различные силы сравниваются с силами сильного взаимодействия, чье действие принимается условно за единицу. Сравнение показывает, что сильное взаимодействие вполне соответствует своему названию и является самым сильным в природе. Но действует оно лишь на расстоянии  $\sim 10^{-15}$  метра. Сильное взаимодействие удерживает протоны и нейтроны в ядрах, кварки в протонах и нейтронах. Второе по силе электромагнитное взаимодействие примерно в 100 раз слабее сильного, но оно распространяется до бесконечности. Электромагнитные силы удерживают электроны в атомах, связывают атомы в молекулы, молекулы в жидкие и твердые тела.

Третье по силе слабое взаимодействие примерно в 1000 раз слабее сильного и действует на еще меньших расстояниях порядка  $10^{-17}$  метра. Эти силы действуют при бета-распаде атомных ядер, при взаимных превращениях кварков и лептонов. Самым слабым в природе взаимодействием является гравитационное взаимодействие. Оно примерно в  $10^{39}$  раз слабее сильного.

Именно эта самая слабая сила удерживает нас на поверхности Земли, создает атмосферное давление, управляет движением планет, звезд, галактик.

При взаимодействиях макроскопических тел гравитационное взаимодействие оказывается основным по той причине, что при небольших значениях температуры сближению ядер до расстояния радиуса действия сильного взаимодействия препятствуют кулоновские силы отталкивания между электронными оболочками атомов. Электромагнитное взаимодействие между электрически нейтральными звездами и планетами почти отсутствует, небольшое влияние на Землю оказывают только потоки заряженных частиц, испускаемых Солнцем. Между удаленными друг от друга звездами нет и такого взаимодействия.

### Большой Взрыв и Сверхновые звезды (уровень В)

В развитии науки временами происходят удивительные повороты и встречи независимо развивающихся весьма удаленных ее ветвей. Такими ветвями науки представлялись долгое время физика и астрономия.

По мере того, как в астрономии от описания видимых движений небесных тел интерес все более перемещался в сторону изучения физической природы небесных тел, методы исследования и круг изучаемых явлений физики и астрономии непрерывно сближались. И сегодня смыкание этих двух наук произошло в совершенно неожиданном месте: в теории происхождения Вселенной и теории происхождения элементарных частиц и атомов.

Согласно теории Большого Взрыва все наблюдаемые сейчас галактики, звезды, туманности, планеты являются результатом колоссального взрыва, произошедшего примерно 15 миллиардов лет тому назад.

В начальный момент «радиус Вселенной» был невообразимо мал и составлял менее  $10^{-35}$  м, температура достигала значения  $\sim 10^{33}$  К.

При такой высокой температуре невозможно существование не только атомов или атомных ядер, но и никаких элементарных частиц. Нет ни сильного, ни гравитационного, ни слабого, ни электромагнитного взаимодействия.

Происходит Большой Взрыв и Вселенная начинает расширяться. За интервал времени от  $10^{-35}$  секунды до  $10^{-10}$  секунды образуется плотная смесь из лептонов и антилептонов, кварков и антикварков.

Около  $10^{-6}$  секунды начинается соединение кварков и антикварков в протоны, нейтроны, мезоны, антипротоны, антинейтроны. Количество частиц и античастиц почти одинаково, но все-таки частиц примерно на одну миллиардную долю больше, чем античастиц. В результате аннигиляции протонов с антипротонами, нейтронов с антинейтронами возникает очень плотное электромагнитное излучение. Плотность излучения примерно в миллиард раз выше плотности вещества.

К концу первой секунды температура падает до  $\sim 10^{10}$  К, плотность падает до  $\sim 10^7 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , что уже меньше плотности ядерного вещества, а радиус Вселенной достигает примерно  $10^{15}$  м, что примерно в 100 раз меньше расстояния до ближайших от Солнца звезд.

В период от 1 секунды с момента начала Взрыва и до конца пятой минуты происходит образование ядер гелия  ${}^4\text{He}$  из протонов и нейтронов.

От пятой минуты до 1 000 000 лет происходит дальнейшее расширение. Плотность излучения к конце этого периода становится примерно равной плотности вещества и имеет значение  $\sim 10^{-19} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ . Радиус Вселенной достигает значения порядка  $10^{24}$  м, что примерно в 100 раз меньше ее современных размеров, температура падает до  $\sim 3000$  К. При такой температуре становится возможным удержание электронов около атомных ядер и происходит образование атомов водорода и гелия. Дальнейшее расширение Вселенной ведет к еще большему ее охлаждению, из водорода и гелия начинается образование звезд, туманностей, галактик.

К настоящему времени, через 15 миллиардов лет после Большого Взрыва, радиус Вселенной достиг значения  $\sim 10^{26}$  м, плотность вещества  $\sim 6 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , что соответствует среднему содержанию четырех атомов водорода в  $1 \text{ м}^3$ , температура межгалактического электромагнитного излучения  $\sim 3$  К.

Теория Большого Взрыва объяснила происхождение водорода и гелия, причину разбегания Галактик, происхождение радиоизлучения с температурой 3 К, но не смогла объяснить происхождение химических элементов за гелием. Оказалось, что все более тяжелые элементы образовались на более поздних этапах развития Вселенной и основ-

ной источник их происхождения — вспышки Сверхновых звезд.

При конденсации водорода и гелия в звезды в результате сжатия гравитационными силами температура газа снова повышается и начинаются процессы термоядерного синтеза гелия из водорода. Запасов водорода в такой звезде, как Солнце, достаточно примерно на 10 миллиардов лет непрерывного свечения.

Если же звезда обладает массой в ~10 раз большей массы Солнца, то она светит значительно ярче и сжигает свои запасы водорода примерно в 1000 раз быстрее, всего лишь за 10 миллионов лет. После исчерпания запасов водорода термоядерные реакции в недрах такой звезды прекращаются, температура и давление уменьшаются и звезда начинает сжиматься.

Сжатие звезды длится несколько десятков тысяч лет, при этом плотность в центральной части звезды возрастает от  $\sim 6 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  до  $\sim 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , а температура от 40 миллионов кельвин до 190 миллионов кельвин. При такой высокой температуре начинаются ядерные реакции синтеза ядер углерода и кислорода из ядер гелия. Повышение температуры центральной части звезды ведет к разогреванию и расширению ее внешней оболочки, радиус звезды достигает ~300 миллионов километров, что вдвое превышает радиус Земной орбиты. Звезда становится красным сверхгигантом.

После израсходования запасов гелия менее чем за миллион лет происходит новый цикл сжатия и при плотности  $\sim 2 \cdot 10^8 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  и температуре ~740 млн К начинаются реакции синтеза ядер неона, магния и натрия из ядер углерода. Углерод сжигается примерно за 12000 лет, затем наступает очередь неона, который сжигается при температуре ~1,6 млрд К примерно за 12 лет, кислорода (2,1 млрд К, 4 года), серы и кремния (3,4 млрд К, 1 неделя).

Из ядер серы и кремния синтезируются ядра железа. Ядро железа это самое тяжелое ядро, синтез которого происходит с выделением энергии. Для синтеза более тяжелых ядер нужно затрачивать энергию. Поэтому реакции синтеза далее не идут, выделение энергии в железной сердцевине звезды прекращается. Масса железной сердцевины звезды примерно за сутки достигает значения ~1,5 мас-

сы Солнца. С этого момента при отсутствии источника энергии внутри железная сердцевина звезды может не выдержать колоссального внешнего давления и начинает очень быстро сжиматься. Этот процесс называется **коллапсом звезды**. За малую долю секунды центральная часть звезды радиусом примерно равным радиусу Земли сжимается в шар радиусом около 100 км. Давление достигает таких больших значений, что электроны «вдавливаются» в протоны, превращая их в нейтроны, весь этот стокилометровый шар становится шаром ядерного вещества — нейтронной звездой. Падение вещества с массой больше массы Солнца за доли секунды вызывает столь сильное сжатие ядерного вещества, что его плотность примерно в 1,5 раза превышает плотность обычных атомных ядер. После сжатия начинается волна расширения сжатого шара ядерного вещества. Волна расширения встречается с веществом, продолжающим падать к центру звезды, температура повышается примерно до 10 млрд К и происходит гигантский взрыв, который называют вспышкой Сверхновой звезды.

При вспышке Сверхновой звезды выделяется энергия примерно  $3 \cdot 10^{46}$  Дж. В течение 10 секунд взрыва освобождается в 100 раз большее количество энергии, чем излучает Солнце за 10 млрд лет своей жизни. Более 99% этой энергии уносят частицы нейтрино. На долю светового излучения приходится примерно три стотысячных доли общей энергии взрыва, но и при такой малой доле энергии светового излучения Сверхновая звезда в максимуме светит ярче Солнца в сотни миллионов раз.

Температура в недрах будущей Сверхновой звезды убывает по мере удаления от ее центра. Поэтому на разной глубине одновременно происходят различные ядерные реакции синтеза и образуются слои, состоящие из разных химических элементов.

При взрыве Сверхновой верхние слои вещества звезды с массой, примерно равной массе Солнца, разбрасываются в межзвездное пространство со скоростью в тысячи километров в секунду. В процессе взрыва продолжают ядерные реакции и образуются ядра всех остальных химических элементов за железом. Таким образом создается вещество, из которого впоследствии могут сформироваться планеты, а на планетах начаться процесс зарождения и эволюции жизни.

Вспышка Сверхновой довольно редкое явление. В галактике, содержащей сотни миллиардов звезд, вспышка Сверхновой бывает раз в несколько столетий. Однако, за 10 млрд лет времени существования Вселенной в нашей Галактике произошли десятки миллионов вспышек Сверхновых.

*Контрольная  
работа*

### Тест №6 (уровень А)

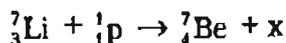
1. Какие частицы из перечисленных ниже легче других способны проникать в атомное ядро и вызывать ядерные реакции?

- А. Электроны.  
 Б. Протоны.  
 В. Альфа-частицы.  
 Г. Нейтроны.  
 Д. Все перечисленные в А–Г примерно одинаково.

2. Может ли при осуществлении ядерной реакции выделиться большее количество энергии, чем приносит в ядро частица, вызывающая реакцию?

- А. Может, но только в реакциях синтеза.  
 Б. Может, но только в реакциях деления ядер.  
 В. Может в различных типах реакций.  
 Г. Не может ни в каких реакциях.  
 Д. Выделение энергии всегда равно поглощенной энергии.

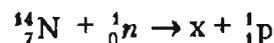
3. При столкновении протона  ${}^1_1\text{p}$  с ядром атома изотопа лития  ${}^7_3\text{Li}$  образуется ядро изотопа бериллия  ${}^7_4\text{Be}$  и вылетает какая-то еще частица  $x$ :



Какая это частица?

- А. Гамма-квант.  
 Б. Электрон.  
 В. Позитрон.  
 Г. Протон.  
 Д. Нейтрон.

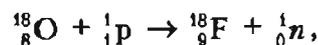
4. Ядро атома изотопа азота  ${}^{14}_7\text{N}$  поглощает нейтрон  ${}^1_0\text{n}$ , испускает протон  ${}^1_1\text{p}$  и превращается в ядро  $x$ :



Ядром какого изотопа является ядро  $x$ ?

- А.  ${}^{15}_7\text{N}$ .                       Б.  ${}^{16}_7\text{N}$ .  
 В.  ${}^{14}_6\text{C}$ .                         Г.  ${}^{15}_6\text{C}$ .  
 Д.  ${}^{12}_8\text{C}$ .

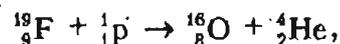
5. Возможна ли в принципе ядерная реакция



если известно, что сумма масс ядра атома кислорода  ${}^{18}_8\text{O}$  и протона  ${}^1_1\text{p}$  меньше суммы масс ядра атома фтора  ${}^{18}_9\text{F}$  и нейтрона  ${}^1_0\text{n}$ . Если возможна, то выделяется или поглощается энергия в этой реакции?

- А. Реакция невозможна.  
 Б. Реакция возможна, энергия поглощается.  
 В. Реакция возможна, энергия выделяется.  
 Г. Реакция возможна, энергия не выделяется и не поглощается.  
 Д. Реакция возможна, энергия может поглощаться или выделяться.

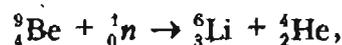
6. Возможна ли в принципе ядерная реакция



если известно, что сумма масс ядра фтора  ${}^{19}_9\text{F}$  и протона  ${}^1_1\text{p}$  больше суммы масс ядра кислорода  ${}^{16}_8\text{O}$  и гелия  ${}^4_2\text{He}$ . Если возможна, то выделяется или поглощается энергия в этой реакции?

- А. Реакция невозможна.  
 Б. Реакция возможна, энергия поглощается.  
 В. Реакция возможна, энергия выделяется.  
 Г. Реакция возможна, энергия не выделяется и не поглощается.  
 Д. Реакция возможна, энергия может поглощаться или выделяться.

7. Возможна ли в принципе ядерная реакция



если известно, что сумма масс ядра бериллия  ${}^9_4\text{Be}$  и нейтрона  ${}^1_0\text{n}$  больше суммы масс ядер

лития  ${}^6_3\text{Li}$  и гелия  ${}^4_2\text{He}$ . Если возможна, то выделяется или поглощается энергия в этой реакции?

- А. Реакция невозможна.  
 Б. Реакция возможна, энергия поглощается.  
 В. Реакция возможна, энергия выделяется.  
 Г. Реакция возможна, энергия не выделяется и не поглощается.  
 Д. Реакция возможна, энергия может поглощаться или выделяться.

8. Какая из перечисленных ниже ядерных реакций является примером реакции термоядерного синтеза?

- А. Образование ядер атомов гелия из ядер атомов водорода.  
 Б. Образование ядер атомов водорода из ядер атомов гелия.  
 В. Образование ядер атомов урана из ядер более легких элементов.  
 Г. Деление ядер урана под действием нейтронов.  
 Д. Все ядерные реакции, идущие с выделением энергии.

9. Почему при делении ядер урана может развиваться цепная реакция?

- А. Потому что при делении каждого ядра урана выделяется большая энергия.  
 Б. Потому что при делении каждого ядра урана освобождается много осколков ядер.  
 В. Потому что при делении каждого ядра урана освобождается несколько протонов.  
 Г. Потому что при делении каждого ядра урана освобождается несколько нейтронов.  
 Д. Потому что при делении каждого ядра урана освобождается несколько гамма-квантов.

10. Каков источник энергии, освобождающееся при делении ядра урана?

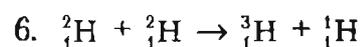
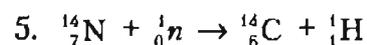
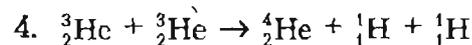
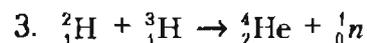
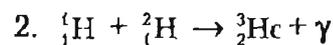
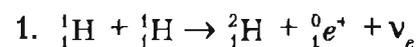
- А. Действие кулоновских сил отталкивания между осколками ядра.

- Б. Действие сил ядерного притяжения между осколками ядра.  
 В. Действие ядерных сил отталкивания между осколками ядра.  
 Г. Действие кулоновских сил притяжения между положительно заряженными осколками ядра и электронами.  
 Д. Энергию приносит нейтрон, вызывающий деление ядра.

*Самостоятельная  
работа*

**Самостоятельная работа №5  
(уровень Б)**

Используя таблицу 4.1, вычислите выход ядерных реакций, приведенных ниже.



8. Вычислите количество энергии, освобождающейся при синтезе 1 кг изотопа гелия  ${}^4_2\text{He}$  из изотопа гелия  ${}^3_2\text{He}$ . Сколько килограммов каменного угля требуется для получения такого количества энергии? Теплотворная способность

$$\text{угля } 3 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

9. Вычислите кинетическую энергию осколков ядра урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$ , испытавшего деление на два одинаковых осколков, считая что вся эта энергия возникает за счет действия кулоновских сил отталкивания. Радиус атомного ядра  $R$  связан с массовым числом  $A$  формулой:

$$R = 1,3 \cdot 10^{-15} \text{ А}^{\frac{1}{3}} \text{ м.}$$

При вычислении можно принять, что действие кулоновских сил является преобладающим при расстоянии между центрами осколков, равном диаметру исходного ядра.

10. Вычислите массу радиоактивных продуктов деления ядер урана, накапливающихся в реакторе мощностью  $3 \cdot 10^9$  Вт за 1 сутки, принимая выделение энергии при делении одного ядра урана 235 равным 200 МэВ.

Сравните полученный результат с массой 1 кг радиоактивных продуктов взрыва 20 килотонной атомной бомбы.

*Для тех,*

*кому стало интересно*

## Как делаются открытия (уровень В)

### Открытие деления ядер урана

*Замечательная закономерность садов:  
самая сладкая малина бывает на ветвях,  
свесившихся из соседского сада*

Как ни странно, эта закономерность работает и на участках соседствующих наук. Очень многие открытия делаются на границах раздела наук или даже на «соседских участках».

В действительности в этом нет ничего удивительного, так как деление научного знания о мире на отдельные науки довольно условно, но во многих случаях оно мешает понять какую-то простую истину «хозяину участка», тогда как «соседу» она кажется очевидной. И он собирает урожай с соседского участка.

Именно такой случай произошел с открытием реакции деления ядра урана.

Истории открытия деления ядра урана предшествовали открытие Дж. Чедвиком факта существования нейтронов и открытие Фредериком и Ирен Жолио-Кюри явления искусственной радиоактивности. Искусственно радиоактивные ядра им удалось создать, облучая ядра стабильных атомов альфа-частицами. С открытием нейтронов естественно возникло предположение о возможности создания различных искусственных радиоактив-

ных изотопов путем облучения ядер стабильных изотопов нейтронами.

Быстрее и успешнее всех серию исследований по созданию искусственных радиоактивных изотопов с помощью нейтронов и исследованию их свойств выполнил итальянский физик Энрико Ферми с группой сотрудников. Они провели эксперименты с различными элементами таблицы Менделеева и в большинстве экспериментов получили сходные результаты: при столкновении нейтрона с ядром атома стабильного изотопа в результате ядерной реакции возникало ядро нового изотопа. Этот изотоп обычно оказывался радиоактивным.

Когда очередь дошла до урана, исследователи встретились с неожиданностью: после облучения урана нейтронами возникали новые радиоактивные изотопы, но их химические свойства отличались как от свойств урана, так и от свойств его ближайших соседей слева в таблице Менделеева. И тогда Ферми решил, что при облучении урана нейтронами возникают изотопы новых, еще неизвестных «заурановых» элементов.

Однако с выводом Ферми не согласились некоторые химики, которые обратили внимание на тот факт, что обнаруженные в опытах Ферми химические свойства новых радиоактивных изотопов не соответствуют ожидаемым на основании периодического закона свойствам заурановых элементов. Среди сомневающихся была и Ирен Жолио-Кюри. Она провела совместно с П. Савичем эксперимент по облучению урана нейтронами, исследовала химические свойства получившихся в результате радиоактивных изотопов и пришла к выводу, что эти радиоактивные изотопы по химическим свойствам не отличимы от лантана, находящегося в середине таблицы Менделеева.

Сообщение об этом открытии было опубликовано в научном журнале, но возможность открыть явление деления ядер урана Ирен Кюри, как и Ферми, упустила.

Немецкие химики Отто Ган и Фриц Штрассман прочитали статью Ирен Кюри и Савича. Отто Ган, крупнейший специалист в области радиохимии, был просто возмущен этой публикацией. Это наверняка был «грязный эксперимент», такого результата быть не должно. Штрассман подготовил экспериментальную установку и предложил повторить опыты Ирен Кюри с тем, чтобы опровергнуть

или подтвердить полученные ею результаты. Ган и Штрассман проделали эксперимент и убедились, что среди продуктов облучения урана нейтронами действительно есть радиоактивные изотопы, не отличимые по химическим свойствам от лантана и бария.

И вот здесь в головы химиков пришла та мысль, которая должна была прийти в головы физиков Ферми и Кюри, но почему-то не пришла: так как число нуклонов в ядрах лантана и бария в сумме примерно равно числу нуклонов в ядре урана, наверное они являются двумя осколками ядра урана, разделившегося на две части под действием нейтрона.

Поздно вечером они закончили работу над коротким письмом в научный журнал, в котором сооб-

щали о результатах своего эксперимента и высказывали гипотезу о возможности деления ядра урана под действием нейтрона.

Утром Ган пришел в лабораторию и сказал, что он хорошо подумал и решил, что никак не подходит химикам высказывать какие-то гипотезы по поводу физических процессов, тем более таких сложных, в которых и сами физики не вполне разбираются. Письмо в журнал не следует отправлять, так как оно может сделать их просто смешными в глазах специалистов-физиков. На это Штрассман ответил, что письмо уже ушло и вернуть его невозможно. Письмо было опубликовано и за Ганом и Штрассманом признан во всем мире приоритет открытия деления ядер урана. За это открытие они были награждены Нобелевской премией.



### Изучив эту тему,

- вы узнаете, чем опасны ионизирующие излучения для человека;
- поймете, что для предупреждения опасности облучения нужно измерять дозы излучения;
- научитесь оценивать степень опасности ионизирующих излучений в зависимости от мощности дозы

### Основные понятия:

Взаимодействие ядерных излучений с веществом • Экспозиционная доза • Поглощенная доза • Эквивалентная доза • Естественный фон радиации • Биологическое действие ионизирующих излучений • Атомные электростанции и охрана окружающей среды • Атомная бомба • Ядерный взрыв • Термоядерная бомба

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

### Свойства ионизирующих излучений. Взаимодействие ядерных излучений с веществом (уровень А)

При движении через вещество заряженные частицы взаимодействуют с электронными оболочками атомов. В результате этих взаимодействий происходит возбуждение или ионизация атомов. Длина пробега частицы в среде зависит от ее заряда, начальной энергии, массы и плотности среды, в которой происходит движение.

Например, альфа-частицы с энергией 4 МэВ обладают длиной пробега в воздухе примерно 2,5 см, в

воде или мягких тканях животных — сотые доли миллиметра.

Проникающая способность бета-частиц несколько больше проникающей способности альфа-частиц, однако от потока бета-частиц с максимальной энергией частиц 2 МэВ полностью защищает слой алюминия толщиной 3,5 мм.

Альфа и бета-излучения обычно не представляют опасности при внешнем облучении. Плотная одежда может поглотить значительную часть бета-частиц и совсем не пропускает альфа-частицы. При попадании внутрь человеческого организма с пи-

щей, водой и воздухом или при загрязнении поверхности тела альфа- и бета- радиоактивные изотопы могут представлять серьезную опасность для здоровья человека. Гамма-кванты взаимодействуют с атомами, передавая часть своей энергии электронам оболочки. Эти электроны производят затем ионизацию и возбуждение атомов среды.

Пути пробега гамма-квантов в воздухе измеряются сотнями метров, в твердом веществе — десятками сантиметров и даже метрами.

В таблице 6.1 приведены сведения о свойствах различных ионизирующих излучений.

*Лабораторная работа*

**Изучение свойств ядерных излучений**

(уровень А, выполняется в классе)

**Цель работы.** Исследование проникающей способности альфа-, бета- и гамма-излучений.

**Оборудование.** Школьный набор радиоактивных препаратов, счетчик Гейгера–Мюллера, выпрямитель, усилитель низкой частоты, динамик, алюминиевая пластина толщиной 1–2 мм, две свинцовые пластины толщиной 2 мм.

**Задачи.** Исследуйте, как изменяется интенсивность альфа-, бета- и гамма-излучения при прохождении через лист бумаги, алюминиевую и свинцовую пластину.

**Содержание работы.**

Для выполнения задания необходим прибор, способный регистрировать все три вида радиоактивных излучений. Наиболее подходящим для этой цели является торцовый счетчик Гейгера–Мюллера с устройством, регистрирующим импульсы от счетчика.

При отсутствии такого прибора можно воспользоваться школьным цилиндрическим счетчиком Гейгера–Мюллера, подавая импульсы с его выхода на вход усилителя низкой частоты, соединенного с динамиком.

Для проведения экспериментов необходим также школьный набор радиоактивных препаратов, содержащий альфа-радиоактивный препарат плутония, бета-радиоактивный препарат стронция 90 и гамма-излучающий препарат кобальта 60.

**Порядок выполнения задания.**

1. Подготовьте счетчик Гейгера–Мюллера к работе. Измерьте фон счетчика — число частиц естественного радиоактивного фона, регистрируемое счетчиком при отсутствии вблизи него радиоактивного препарата.
2. Поднесите к счетчику на расстояние около одного сантиметра альфа-радиоактивный препарат. Если вы используете торцовый счетчик, то скорость счета импульсов при этом резко возрастает. Поместите между окошком счетчика и радиоактивным препаратом лист бумаги. Скорость счета при этом должна понизиться до скорости счета фона. Опыт показывает, что альфа-частицы полностью поглощаются листом обыкновенной бумаги.

Если в вашем опыте используется цилиндрический счетчик Гейгера–Мюллера, то при поднесении альфа-радиоактивного препарата скорость счета не должна измениться. Опыт должен показать, что альфа-частицы полностью поглощаются в стальном катоде и не проникают в рабочий объем счетчика.

3. Поднесите к счетчику бета-радиоактивный препарат и проверьте, способны ли бета-частицы проникать сквозь лист бумаги. Затем испытайте в качестве преграды алюминиевую и свинцовую пластины.
4. Поднесите к счетчику гамма-излучающий радиоактивный препарат и исследуйте проникающую способность гамма-излучения, помещая между препаратом и счетчиком лист бумаги, алюминиевую и свинцовые пластины.

*Конспект.*

*Таблицы. Схемы*

**Дозиметрия (уровень А)**

**Экспозиционная доза**

Количественной мерой действия ионизирующего излучения служит экспозиционная доза. Экспозиционная доза характеризует ионизирующее действие излучения на воздух. За единицу экспозиционной дозы принята такая доза, которая создает 1 Кл электрического заряда ионов каждого знака в 1 кг воздуха.

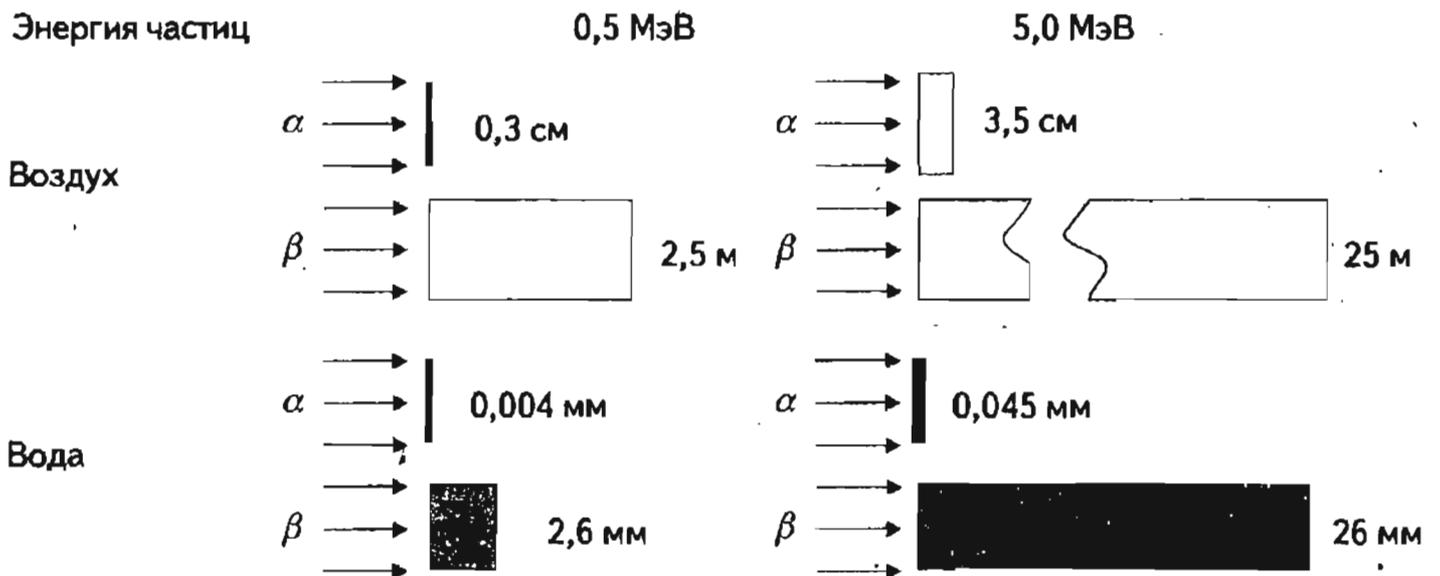
Таблица 6.1

## СВОЙСТВА ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Основные процессы, сопровождающие прохождение быстрых заряженных частиц через вещество



Длина пробега альфа-частиц и электронов в воздухе и воде



Основные процессы, сопровождающие прохождение рентгеновского и гамма-излучения через вещество



Поглощение гамма-излучения в веществе

Энергия гамма-квантов	Толщина слоя вещества, ослабляющего поток гамма-излучения в десять раз		
	Вода	Бетон	Свинец
0,5 МэВ	24 см	12 см	1,3 см
1,0 МэВ	33 см	16 см	2,9 см
5,0 МэВ	76 см	36 см	4,7 см

Ранее употреблялась единица экспозиционной дозы 1 рентген:

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл} \cdot \text{кг}^{-1}$$

Такая доза накапливается за один час на расстоянии 1 м от радиоактивного препарата радия массой 1 г.

Мощность экспозиционной дозы измеряется в таких единицах, как  $1 \frac{\text{Р}}{\text{с}}$ ,  $1 \frac{\text{мР}}{\text{с}}$ ,  $1 \frac{\text{мкР}}{\text{с}}$ ,  $1 \frac{\text{мР}}{\text{час}}$ .

### Поглощенная доза ионизирующего излучения

Поглощенная доза излучения  $D$  есть отношение энергии  $E$ , переданной ионизирующим излучением веществу, к массе  $m$  вещества. За единицу поглощенной дозы принят один грей (Гр). При поглощенной дозе излучения в 1 Гр излучение передает одному килограмму вещества энергию один джоуль:

$$D = \frac{E}{m}, \quad 1 \text{ Гр} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}} = 1 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

Ранее для измерения поглощенной дозы применялась единица рад:

$$1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}, \quad 1 \text{ рад} = 0,01 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Отношение поглощенной дозы излучения  $D$  ко времени облучения  $t$  называется мощностью дозы излучения  $P$ :

$$P = \frac{D}{t}.$$

Мощность дозы измеряется в единицах  $1 \frac{\text{Гр}}{\text{с}}$  или  $1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ , а также в единицах  $1 \frac{\text{мрад}}{\text{с}}$ ,  $1 \frac{\text{мкрад}}{\text{с}}$ ,  $1 \frac{\text{мрад}}{\text{час}}$ .

При облучении мягких тканей человеческого организма рентгеновским или гамма-излучением экспозиционной дозе 1 Р соответствует поглощенная доза 0,88 рад. В этом случае измеренная прибором экспозиционная доза в рентгенах примерно соответствует поглощенной дозе в тканях организмах в радах.

### Эквивалентная доза

Биологическое действие различных видов излучения на организмы животных и растений не одинаково при одинаковой поглощенной дозе излучения. Различие биологического действия разных видов излучения характеризуется коэффициентом относительной биологической эффективности  $K$ . Относительная биологическая эффективность рентгеновских или гамма-лучей принята за единицу.

Поглощенная доза  $D$ , умноженная на коэффициент относительной биологической эффективности  $K$  характеризует биологическое действие поглощенной дозы и называется эквивалентной дозой  $H$ :

$$H = D \cdot K.$$

Единица эквивалентной дозы в СИ 1 зиверт (1 Зв). Один зиверт равен эквивалентной дозе при поглощенной дозе в 1 грей от излучения с коэффициентом  $K = 1$ .

Употребляется и единица эквивалентной дозы 1 бэр – биологический эквивалент рада:

$$1 \text{ бэр} = 1 \text{ рад} \cdot K = 0,01 \text{ Зв}.$$

Сведения о единицах дозы ионизирующего излучения в СИ приведена в таблице 6.2.

Коэффициент  $K$  для перевода числового значения поглощенной дозы излучения в эквивалентную дозу равен:

- рентгеновское и гамма-излучения – 1;
- электроны, позитроны,  $\beta$ -излучение – 1;
- нейтроны с энергией  $\leq 20$  кэВ – 3;
- нейтроны с энергией  $\leq 0,1$ –10 МэВ – 10;
- протоны с энергией  $\leq 10$  МэВ – 10;
- $\alpha$ -излучение с энергией 10 МэВ – 20.

Связь единиц дозы ионизирующего излучения в СИ с другими единицами:

$$1 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ Р (рентген)}$$

$$1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}, \quad 1 \text{ рад} = 0,01 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$$

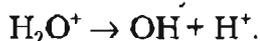
(бэр – биологический эквивалент рентгена)

### Биологическое действие ионизирующих излучений

Биологическое действие ионизирующей радиации на живой организм обусловлено химическими процессами, происходящими в живых клетках после их облучения. Организм млекопитающего состоит примерно на 75% из воды. При дозе 6 Гр в  $1 \text{ см}^3$  ткани происходит ионизация примерно  $10^{15}$  молекул воды.

Положительный ион воды  $\text{H}_2\text{O}^+$ , образовавшийся в результате ионизации, и отрицательный ион воды  $\text{H}_2\text{O}^-$ , получающийся в результате присоединения

свободного электрона нейтральной молекулой, нестабильны. Каждый из них разлагается на стабильный ион и свободный радикал:



Ионы далее рекомбинируют с образованием нейтральной молекулы воды. Свободные радикалы  $\text{OH}$  и  $\text{H}$  являются очень активными окислителями. В результате реакций окисления они разрушают белки живых клеток, вызывают химическую модификацию молекул, необходимых для нормального функционирования клетки.

Процессы ионизации и химических взаимодействий продуктов ионизации происходят в клетке за миллионные доли секунды. Биохимические изменения в клетке, обусловленные образованием новых молекул, чуждых нормальной клетке, начинаются сразу после момента облучения, но не завершаются за короткое время. Одни следствия биохимических изменений в клетке проявляются уже через несколько секунд после облучения, другие могут привести к гибели клетки или ее раковому перерождению через десятилетия.

Различают три основных вида опасности от воздействия ионизирующей радиации на живой организм — острое поражение, отдаленные последствия и генетические последствия.

Сведения о биологическом действии различных доз излучений на человека приведены в таблице 6.3.

## Естественный фон радиации (уровень Б)

### Естественный фон облучения

Знакомство с фактами отрицательного влияния ионизирующих излучений на организм человека вызывает естественный вопрос, почему же не исключить из жизни человека возможность какого-либо облучения, отказавшись от изготовления и употребления источников радиации. Однако исключить полностью действие ионизирующей радиации на человека невозможно, поскольку радиоактивность не изобретена человеком, а лишь открыта им.

В любом месте на Земле человек подвержен воздействию естественного радиационного фона.

Эта радиация была, когда еще не было жизни на Земле, есть сейчас и будет, когда погаснет Солнце. В условиях существования естественного радиационного фона возникла жизнь на Земле и прошла путь эволюции до своего настоящего состояния.

Поэтому можно с уверенностью сказать, что дозы облучения, близкие к уровню естественного фона, не представляют серьезной опасности для живых организмов.

Часть дозы естественного фона обусловлена внешним облучением, создаваемым гамма-излучением естественных радиоактивных изотопов земной коры — урана, тория, калия и ряда других элементов. Мощность дозы внешнего фонового гамма-излучения колеблется в большинстве мест от 0,3 до 0,6 миллизиверта (0,03–0,06 бэр) в год, среднее значение равно примерно 0,35 миллизиверта.

Второй источник облучения — космические лучи. Космическими лучами у поверхности Земли называют поток гамма-квантов и быстрых заряженных частиц — электронов и мю-мезонов, возникающих в атмосфере Земли под действием первичного космического излучения.

На уровне моря космические лучи обуславливают дозу облучения 0,3 миллизиверта в год ( $0,03 \frac{\text{бэр}}{\text{год}}$ ). При подъеме в верхние слои атмосферы мощность потока космического излучения возрастает. На высоте 3000 м над уровнем моря она увеличивается примерно в три раза.

Кроме внешнего облучения каждый живой организм подвергается внутреннему облучению. Внутреннее облучение живого организма обусловлено тем, что с пищей, водой и воздухом в него попадают различные химические элементы, обладающие естественной радиоактивностью. К числу таких элементов относятся в первую очередь углерод, калий, уран, торий, радий, радон.

Углерод биологического происхождения содержит радиоактивный изотоп  $^{14}\text{C}$  в концентрации один радиоактивный атом на миллион миллионов стабильных атомов. При периоде полураспада изотопа  $^{14}\text{C}$  5600 лет такая концентрация обуславливает удельную радиоактивность углерода 15 распадов в минуту на грамм. Организм человека примерно на 18 % состоит из углерода, в теле человека массой 70 кг содержится около 13 кг углерода. Отсюда общая активность углерода  $^{14}\text{C}$  в нем равна примерно  $13000 \text{ г} \cdot 15 \frac{\text{расп}}{\text{мин}} \approx 200000 \frac{\text{расп}}{\text{мин}}$ .

В теле человека содержится около 150 г калия. В одном грамме природного калия происходит примерно 2000 бета-распадов в минуту радиоактивного изотопа калия 40. Поэтому в тканях организма

человека происходит  $\approx 300\,000$  бета-распадов в минуту ядер изотопа калия 40.

Кроме радиоактивных изотопов углерода и калия в организм человека попадают химические элементы радиоактивных рядов урана и тория. Количество этих элементов в организме человека сильно зависит от употребляемой им пищи.

В целом среднее значение эквивалентной дозы облучения, обусловленной естественными радиоактивными изотопами, попадающими в организм человека с пищей и водой, составляют примерно  $0,35$  мЗв в год ( $0,035$  бэр в год).

Наиболее значительный вклад в дозу внутреннего облучения в большинстве мест на Земле делают радиоактивный радон и продукты его распада, попадающие в организм человека при дыхании.

Радон является продуктом радиоактивного распада радия. Радий в свою очередь является продуктом радиоактивного распада урана. Уран содержится в земной коре и в любых почвах. Поэтому радон постоянно образуется в почве повсеместно на Земле. Радон — инертный газ, поэтому в почве он не удерживается и постепенно выходит в атмосферу. Концентрация радона повышается в закрытых непроветриваемых помещениях, особенно высока она в подвальных помещениях, в нижних этажах зданий, близких к почве.

В большинстве домов удельная активность радона и продуктов его распада составляет около  $50 \frac{\text{Бк}}{\text{м}^3}$ , что примерно в 25 раз выше среднего уровня удельной активности атмосферного воздуха вне зданий.

Среднее значение эквивалентной дозы облучения, обусловленной радоном и продуктами его распада, составляет 1 миллизиверт в год ( $0,1$  бэр в год). Это примерно половина средней годовой дозы облучения, получаемой человеком от всех естественных источников радиации. Таким образом, среднее значение эквивалентной дозы облучения, обусловленной естественным радиационным фоном, составляет около  $2$  мЗв в год ( $0,2$  бэр в год).

#### Источники излучения, используемые в медицине

В настоящее время все люди на Земле подвержены действию ионизирующей радиации не только естественного, но и искусственного происхождения. К искусственным источникам радиации, созданным человеком, относятся рентгеновские

диагностические и терапевтические установки, различные средства автоматического контроля и управления, использующие радиоактивные изотопы, ядерные энергетические и исследовательские реакторы, ускорители заряженных частиц и различные высоковольтные электровакуумные приборы, отходы тепловых и атомных электростанций, продукты ядерных взрывов.

Из всех искусственных источников ионизирующей радиации для большинства людей наибольшую роль играют источники рентгеновского излучения, используемые в медицине. Средняя эквивалентная доза, получаемая человеком за год, в промышленно развитых странах составляет около  $1$  мЗв ( $0,1$  бэр), т. е. около половины дозы естественного фона.

#### Предельно допустимые дозы облучения

Невозможность полного исключения облучения человека из-за существования радиационного фона и нерациональность полного отказа от использования каких-либо устройств, являющихся дополнительными источниками радиации, привели к необходимости установления санитарных норм радиационной безопасности.

Согласно этим нормам, предельно допустимой дозой облучения для лиц, профессионально связанных с использованием источников ионизирующей радиации, является доза  $50$  мЗв в год ( $5$  бэр в год). Этот уровень облучения был принят за допустимый на том основании, что он близок к уровню естественного радиационного фона в некоторых местах на Земле и никаких отрицательных последствий для человека при действии таких доз не обнаружено.

С учетом того, что дополнительное облучение в этом случае происходит только на рабочих местах в течение 36 часов в неделю, предельная допустимая мощность экспозиционной дозы в случае гамма излучения или рентгеновского излучения составляет  $2,8 \frac{\text{мР}}{\text{час}}$  или  $0,8 \frac{\text{мкР}}{\text{с}}$ .

#### Опасность радиоактивного загрязнения (уровень Б)

##### Атомные электростанции и охрана окружающей среды

Главная потенциальная опасность ядерной энергетики обусловлена тем обстоятельством, что в ядерном реакторе в процессе работы образуется очень

большое количество искусственных радиоактивных ядер. Искусственные радиоактивные ядра образуются в двух различных процессах. Первый процесс — деление ядер урана. В каждом ядре-осколке имеется большой избыток нейтронов по сравнению со стабильным ядром с тем же массовым числом  $A$ . Избыток нейтронов обуславливает избыток энергии, от которого ядра-осколки избавляются путем нескольких бета-распадов с превращением части нейтронов в ядре в протоны. Второй процесс — образование искусственных радиоактивных изотопов из стабильных изотопов в результате поглощения нейтронов. Поглощение нейтронов приводит к возникновению ядер с избытком нейтронов, такие ядра бета-радиоактивны. В результате этого процесса все детали конструкций реактора, все материалы и вещества внутри активной зоны реактора становятся радиоактивными.

По мере работы реактора количество радиоактивных изотопов в его активной зоне непрерывно увеличивается. Поскольку в ядерном реакторе осуществляется та же самая цепная ядерная реакция, что и при взрыве атомной бомбы, внутри реактора накапливаются такие же радиоактивные изотопы, какие выбрасываются при атомном взрыве.

Авария на ядерном реакторе может привести к выбросу опасных для жизни людей радиоактивных изотопов в атмосферу Земли и рассеянию их по всей поверхности земного шара. Именно такая авария произошла на Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 года.

При этой аварии в атмосферу произошел выброс около 7 тонн ядерного топлива с продуктами деления ядер урана. Из-за радиоактивного загрязнения значительные территории вокруг АЭС стали непригодными для жизни людей, более 100 000 жителей оказались вынужденными к эвакуации из своих домов, сел, районов. Авария, случившаяся на Чернобыльской АЭС, поставила под сомнение принятые прежде критерии безопасности на атомных электростанциях и целесообразность дальнейшего развития ядерной энергетики.

### Атомная бомба

В атомной бомбе цепная реакция развивается на быстрых нейтронах без использования замедлителя. Для этого производится разделение изотопов урана 235 и 238 и изготавливаются части будущей бомбы из урана 235. Если две части заряда из ура-

на 235 с массой немного меньше критической массы у каждого быстро соединить, то в уране развивается цепная реакция и выделяется очень большое количество энергии. Температура урана за малые доли секунды повышается до нескольких миллионов градусов. При такой температуре уран и все предметы вокруг него превращаются в пар. Светящийся шар раскаленных газов быстро расширяется и все разрушает и сжигает на своем пути. Так происходит ядерный взрыв.

При взрыве такой атомной бомбы, какая была сброшена на Хиросиму, происходит деление примерно 1 кг ядер урана и выделяется энергия  $E \approx 8,3 \cdot 10^{13}$  Дж.

Эта энергия эквивалентна энергии взрыва 20 000 тонн самого сильного химического взрывчатого вещества — тринитротолуола.

Впоследствии были разработаны еще более мощные бомбы, называемые термоядерными бомбами.

Бомба, которую называют термоядерной бомбой, в действительности является сложным устройством, в котором используются на разных стадиях развития взрыва различные ядерные реакции.

В середине такой бомбы находится обычная атомная бомба, вокруг нее слой, содержащий легкие элементы, например, изотопы водорода, дейтерий и тритий, затем слой из нескольких тонн природного урана.

Приведение бомбы в действие начинается со взрыва обычной атомной бомбы, находящейся в середине термоядерной бомбы. При взрыве атомной бомбы температура внутри нее повышается до миллионов градусов. При такой высокой температуре и высоком давлении дейтерий и тритий вступают в термоядерную реакцию синтеза с образованием ядер гелия. При осуществлении термоядерного синтеза гелия из водорода не только выделяется дополнительная энергия, но и освобождается большое количество нейтронов. Энергия этих нейтронов настолько велика, что они вызывают деление ядер основного природного изотопа урана 238 в третьем слое бомбы. На этом этапе и освобождается основная часть энергии взрыва термоядерной бомбы.

В таких бомбах может происходить деление 1000 кг и более урана. При делении 1 т ядер урана освобождается энергия  $\sim 8,3 \cdot 10^{16}$ , что эквивалентно взрыву 20 миллионов тонн тринитротолуола (бомба в 20 мегатонн ТНТ).

В настоящее время в мире накоплено около 50 000 единиц ядерного оружия с общей мощностью, эквивалентной 15 миллиардам тонн химических взрывчатых веществ, т. е. примерно по 3 тонны на каждого жителя Земли. Даже без атомной войны такие запасы ядерной взрывчатки представляют большую опасность в случае какой-либо аварии или преднамеренного акта.

Угрозу всему живому на Земле несут и любые испытательные ядерные взрывы. Взрыв одной ядерной бомбы в 20 мегатонн ТНТ, кроме разрушений и пожаров на площади ~500 км<sup>2</sup> (в радиусе ~13 км), загрязняет окружающую среду радиоактивными изотопами.

Наглядное представление о масштабах опасности радиоактивного загрязнения поверхности Земли

при ядерных взрывах можно получить, познакомившись со следующими цифрами.

При взрыве ядерной бомбы мощностью в 20 мегатонн (20 Мт ТНТ) активность выбрасываемых в атмосферу продуктов взрыва равна примерно  $4 \cdot 10^{16}$  Бк. Если разделить это число на 6 миллиардов, то получится значение активности радиоактивного загрязнения на одного жителя Земли, равное примерно  $7 \cdot 10^{16}$  Бк. Такой активностью обладают примерно 2 тонны радия. Большинство радиоактивных изотопов в продуктах деления ядер урана имеют малые периоды полураспада, но и через 2 года активность продуктов такого взрыва еще будет составлять примерно  $7 \cdot 10^{19}$  Бк, что эквивалентно активности 1000 тонн радия.

Таблица 6.2. Дозы ионизирующего излучения (единицы международной системы)

Наименование величины	Единицы			Определение
	Наименования	Обозначение		
		русское	международное	
Экспозиционная доза излучения	кулон на килограмм	$\frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{C}}{\text{kg}}$	Кулон на килограмм равен экспозиционной дозе рентгеновского и гамма-излучений, при которой сопряженная корпускулярная эмиссия в сухом атмосферном воздухе массой 1 кг производит ионы, несущие электрический заряд каждого знака, равный 1 Кл
Поглощенная доза излучения	грэй	Гр	Gy	Грэй равен поглощенной дозе излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж
Мощность поглощенной дозы излучения	грэй в секунду	$\frac{\text{Гр}}{\text{с}}$	$\frac{\text{Gy}}{\text{s}}$	Грэй в секунду равен мощности поглощенной дозы излучения, при которой за время 1 с облученным веществом поглощается доза излучения 1 Гр
Эквивалентная доза излучения	зиверт	Зв	Sv	Зиверт равен эквивалентной дозе излучения, при которой поглощенная доза равна 1 Гр и коэффициент К качества излучения равен единице
Мощность эквивалентной дозы излучения	зиверт в секунду	$\frac{\text{Зв}}{\text{с}}$	$\frac{\text{Sv}}{\text{s}}$	Зиверт в секунду равен мощности эквивалентной дозы излучения, при которой за время 1 с облучаемым веществом поглощается эквивалентная доза излучения 1 Зв

Таблица 6.3. Биологическое действие ионизирующих излучений

**Острое поражение организма взрослого человека в результате однократного облучения**

Эквивалентная доза	Последствия общего облучения
0,1–0,5 Зв (10–50 бэр)	Гибель отдельных клеток крови и половых клеток, временная стерильность мужчин
0,5–1,0 Зв (50–100 бэр)	Нарушения в работе кроветворной системы, уменьшение числа лимфоцитов
3–5 Зв (300–500 бэр)	≈50% облученных умирает от лучевой болезни в течение 1–2 месяцев. Основная причина – поражение клеток костного мозга, результатом которого является резкое снижение количества лейкоцитов в крови
10–50 Зв (1000–5000 бэр)	100% облученных умирает через 1–2 недели вследствие внутренних кровоизлияний в желудочно-кишечном тракте в результате гибели клеток слизистых оболочек желудка и кишечника

**Отдаленные последствия облучения**

Эквивалентная доза	Вид заболевания	Число случаев на 1000 человек
1 Зв (100 бэр)	Лейкозы	2
	Рак щитовидной железы	10
	Рак легких	5
	Рак молочной железы	10

Вероятность ракового заболевания для взрослого человека, получившего эквивалентную дозу облучения в 0,01 Зв (1 бэр) составляет  $2 \cdot 10^{-4}$ – $3 \cdot 10^{-4}$ .

**Генетические последствия облучения**

Хроническое облучение родителей с эквивалентной дозой 1 Зв (100бэр) за 30 лет может привести к появлению примерно 2 генетических заболеваний на 1000 рожденных детей.

Один ядерный взрыв мощностью 20 Мт ТНТ делает смертельно опасной из-за радиоактивного загрязнения продуктами взрыва зону поверхности Земли площадью примерно 250 000 км<sup>2</sup>. Взрыв 500 таких бомб может сделать непригодной для жизни всю поверхность суши на Земле.

*Контрольная  
работа*

**Тест №7 (уровень Б)**

1. Какой вид радиоактивного излучения обладает наибольшей проникающей способностью?

- А. Альфа-излучение.  
 Б. Бета-излучение.  
 В. Гамма-излучение.  
 Г. Осколки ядер урана.

Д. Все перечисленные в А–Г виды излучения обладают примерно одинаковой проникающей способностью.

2. Какой вид ионизирующей радиации производит наибольшее биологическое действие на живые организмы при одинаковой поглощенной дозе?

- А. Альфа-излучение.  
 Б. Бета-излучение.  
 В. Протоны.  
 Г. Рентгеновское и гамма-излучения.

Д. Все перечисленные в А–Г виды радиации производят одинаковое биологическое действие.

3. Какая физическая величина, характеризующая действие ионизирующего излучения на вещество, имеет единицу, равную  $1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ , и как эта единица называется?

- А. Экспозиционная доза, рентген.  
 Б. Поглощенная доза, грей.  
 В. Поглощенная доза, рад.  
 Г. Эквивалентная доза, бэр.  
 Д. Эквивалентная доза, зиверт.

4. В каких из перечисленных ниже единицах измеряется эквивалентная доза?

- А. Рентген.  
 Б. Кулон·кг<sup>-1</sup>.  
 В. Зиверт.  
 Г. Грей.  
 Д. Рад.

5. Какое из приведенных ниже значений эквивалентной дозы является смертельно опасным для человека при однократном общем облучении?

- А. 2 мЗв (0,2 бэр).  
 Б. 0,1 Зв (10 бэр).  
 В. 0,5 Зв (50 бэр).  
 Г. 5 Зв (500 бэр).  
 Д. При однократном облучении приведенные в А–Г значения эквивалентной дозы не опасны.

6. Каково примерное значение эквивалентной дозы от естественного фона облучения на уровне моря за один год?

- А. 0 Зв (0 бэр).  
 Б. 2 мЗв (0,2 бэр).  
 В. 2·365 мЗв (0,2·365 бэр).  
 Г.  $\frac{2}{365}$  мЗв ( $\frac{0,2}{365}$  бэр).  
 Д. 50 мЗв (5 бэр).

7. Какие из перечисленных ниже источников естественного радиационного фона являются источниками внешнего облучения человека?

1. Гамма-излучение естественных радиоактивных изотопов земной коры.  
 2. Космические лучи.  
 3. Естественные радиоактивные изотопы калия 40 и углерода 14 в организме человека.

- А. Только 1.  
 Б. Только 2.  
 В. Только 3.  
 Г. 1 и 2.  
 Д. 1, 2 и 3.

8. Какие из перечисленных ниже источников естественного радиационного фона являются источниками внутреннего облучения человека?

1. Гамма-излучение естественных радиоактивных изотопов земной коры.
2. Естественные радиоактивные изотопы калия 40 и углерода 14 в продуктах питания.
3. Радон в атмосферном воздухе.
  - А. Только 1.
  - Б. Только 2.
  - В. Только 3.
  - Г. Только 2 и 3.
  - Д. 1, 2 и 3.
9. Какое значение эквивалентной дозы за год принято в качестве предельно допустимой для лиц, профессионально связанных с использованием источников ионизирующей радиации?
  - А. 0 зв (0 бэр).
  - Б. 2 мЗв (0,2 бэр).
  - В. 50 мЗв (5 бэр).
  - Г. 0,1 Зв (10 бэр).
  - Д. 0,5 Зв (50 бэр).
10. Каков основной источник радиоактивности, выбрасываемой в атмосферу Земли при ядерных взрывах и авариях на ядерных реакторах?
  - А. Радиоактивными являются осколки ядер урана.
  - Б. Радиоактивными становятся все атомы вокруг под действием гамма-излучения.
  - В. Радиоактивными становятся все атомы вокруг под действием альфа-излучения.
  - Г. Радиоактивными становятся все атомы вокруг под действием бета-излучения.
  - Д. Примерно в равной мере действуют все причины, перечисленные в А–Г.

*Для тех,*

*кому стало интересно*

### Зачем делаются научные открытия? (уровень В)

Не всем интересно знать, как делаются научные открытия. Сегодня многих людей больше интересует вопрос, зачем делаются открытия. Такой воп-

рос они задают, потому что сомневаются в пользе науки, опасаются непредвиденных последствий новых открытий.

Прежде всего нужно заметить, что сомнения в пользе науки не являются достижением новейшего времени. Отношение к ученым как к опасным колдунам, которые умышленно или по неосторожности могут навлечь беду на остальных людей, было характерно и для древнего времени, и для средних веков. Ученых сжигали на кострах за попытку узнать, как устроено тело человека, за попытку понять, что находится за пределами Земли.

И у современников Майкла Фарадея были сомнения в пользе его научных исследований. Рассказывают, что лабораторию Фарадея, состоявшего на службе в Королевском институте, посетил однажды министр финансов и задал вопрос о том, будет ли какая-то польза Ее Величеству от проводимых исследований. Фарадей ответил, что он не знает, какая именно польза будет людям от его открытий, но он уверен, что следующей министр финансов обязательно обложит налогом в пользу Ее Величества то, что получится из этих открытий. Фарадей не мог представить себе в то время, как изменится мир техники и повседневная жизнь людей благодаря открытию явления электромагнитной индукции, породившему электрогенераторы, электродвигатели, радио и многое другое.

Невозможно угадать прообраз будущего кинескопа телевизора и дисплея компьютера в трубке катодных лучей, представленной на рисунке, с которой работал Дж. Дж. Томсон (рис. 78).

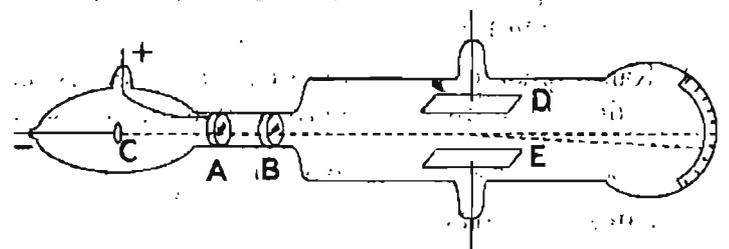


Рис. 78.

Сейчас ни у кого нет сомнений в пользе медицины, электричества, но в пользу открытия атомного ядра и исследований Марса сомнения есть у многих.

Эти сомнения вызываются известными фактами отрицательных последствий использования ядер-

ной энергии, космических ракет для общего дома людей — планеты Земля.

Однако необходимо осознать, что приобретение новых знаний о мире и использование добытых знаний на практике не одно и то же.

Открытие радиоактивности и атомного ядра не принесло вреда ни одному человеку на Земле. Оно открыло новые возможности, а как эти возможности использовать, решают сами люди.

Большинство ученых сознает возможность отрицательных последствий от неразумного применения сделанных ими открытий и стремится предотвратить их, часто рискуя собственной жизнью.

Так было, например, с открытием отрицательного воздействия радиоактивных излучений на организм человека. Открытие этого воздействия было сделано случайно следующим образом. Беккерелю для демонстрации свойств радиоактивных излучений на публичной лекции был нужен радиоактивный препарат высокой активности. Он попросил Пьера и Марию Кюри приготовить для него такой препарат. Был приготовлен препарат радия и передан Беккерелю в закрытой стеклянной ампуле. Эту ампулу Беккерель получил перед лекцией и положил в карман жилета. Там и находился препарат несколько часов. Демонстрации прошли успешно. А вечером Беккерель почувствовал жжение на коже против того места, где находился в кармане радиоактивный препарат, кожа на этом месте покраснела. Болезненные симптомы продолжались довольно долго. Об этом случае Беккерель сообщил Пьеру Кюри, сказав при этом: «Радий я люблю, но я на него сердит».

Пьер Кюри не стал сердиться на радий, а подготовил эксперимент для исследования биологического действия радиоактивных излучений на человека. Он взял радиоактивный препарат в несколько раз большей мощности, чем тот, каким пользовался Беккерель, и привязал его к своей руке. Затем он предупредил всех окружающих о том, что он проводит эксперимент по определению действия излучения на человека и просил в том случае, если он потеряет сознание, не применять никаких лекарств для того чтобы наблюдать результаты воздействия в чистом виде. Он сам вел подробные наблюдения за своим состоянием, проводя необ-

ходимые измерения, записывал все симптомы новой болезни, что он чувствовал, что с ним происходило. Так был описан первый случай лучевой болезни. Хотя поражение организма было довольно тяжелым, Пьер Кюри выздоровел.

Его эксперимент послужил первым серьезным предупреждением о возможной опасности радиоактивного излучения для человека. Правда, сами исследователи радиоактивности узнали о возможной опасности поздно. Мария Кюри, много лет проработавшая с радиоактивными препаратами высокой активности, умерла от рака крови, вызванного чрезмерными дозами облучения.

Можно привести еще много других примеров того, как ученые стремятся узнать что-то новое для достижения совершенно определенных результатов, полезных всему человечеству. И все же в большинстве случаев, относящихся не к прикладным наукам, а к так называемым фундаментальным наукам, изучающим основные законы природы, вместо вопроса: «Зачем делаются открытия?» правильнее задать вопрос: «Почему делаются научные открытия?».

И ответ на этот вопрос очень прост: открытия делаются потому, что человек любопытен. Именно любопытство позволило предкам человека выделиться из всего остального животного мира, осознать свое собственное существование и существование окружающего мира, научиться использовать открываемые свойства мира. И выжил человек в этом мире не благодаря острым зубам или могучей физической силе, а только благодаря своему уму. Конечно, любое новое открытие может принести в мир новые опасности, но без дальнейшего познания мира у человека нет шансов на выживание в этом мире.

Ученые являются «разведчиками» человечества в этом мире. Наукой они занимаются потому, что любопытны, потому что для них попытка узнать у Природы что-то новое, до сих пор никому не известное, есть самое интересное в жизни занятие.

Если вы задумываетесь над вопросом, не заняться ли наукой, то прежде всего ответьте себе на вопрос, действительно ли вам это занятие интереснее всех остальных возможных занятий в жизни? Человек, чье любопытство к миру неодолимо, может стать ученым и сделать новые открытия.

# Ответы и решения

## Механика

### Самостоятельная работа (с. 33)

1. А. 2. Г. 3. Д. 4. Б. 5. Г. 6. Б. 7. Д. 8. Д. 9. В. 10. Б.  
11. В. 12. В. 13. А. 14. А. 15. Б. 16. В. 17. Д.

### Контрольная работа (с. 35)

1. В. 2. Б. 3. Б. 4. Г. 5. Б. 6. В. 7. Б. 8. Г. 9. В. 10. Б.  
11. Б. 12. Г. 13. А. 14. А. 15. В.

### Самостоятельная работа (с. 56)

1. Точное — в); приближенные — а) и б).

2. а)  $\Delta\rho = 0,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;  $\epsilon_\rho = 0,05\%$ ;

б)  $\Delta u_{\text{зп}} = 0,5 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ ;  $\epsilon_u = 0,15\%$ .

3.  $\epsilon_1 = 5\%$ ,  $\epsilon_2 = 2,5\%$ ,  $\epsilon_3 = 1,25\% \cong 1,3\%$ .

4.  $17,0 \cdot 10^{-2} \text{ см}$ ;  $25,0 \cdot 10^{-2} \text{ л}$ .

5.  $\rho_{\text{кворт}} = 1,25 \cdot 10^{-3} \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ ;  $\rho_{\text{геллин}} = 1,8 \cdot 10^{-4} \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ ;

$\rho_{\text{водорода}} = 9 \cdot 10^{-5} \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ .

6.  $\rho = (7,4 \pm 0,2) \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ . 7. 187 г. 8. 2,85 см.

9.  $\Delta l = 0,06$ ; погрешностью микрометра можно пренебречь;  $\Delta l = 0,02$ .

### Контрольная работа (с. 57)

1.  $\Delta\rho = 0,05 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ ;  $\epsilon_\rho = 0,3\%$ .

2.  $\epsilon_1 = 3\%$ ;  $\epsilon_2 = 0,6\%$ ; в пять раз.

3.  $12 \cdot 10^3 \text{ м}$ ;  $5 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ ;  $5 \cdot 10^4 \text{ кг}$ ;  $6,6 \cdot 10^3 \text{ В}$ .

4.  $\epsilon_1 = 0,00013\%$ ;  $\epsilon_2 = 0,012\%$ . 5. Верна последняя запись, 6. 2 кН. 7.  $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . 8.  $(44 \pm 1) \text{ мм}$ ;  $(27,8 \pm 0,1) \text{ см}$ . 9.  $\Delta\rho = 5 \text{ мм рт. ст.}$ ;  $\rho = (756 \pm 5) \text{ мм рт. ст.}$

### Самостоятельная работа (с. 65)

1.  $l = 3,5 \text{ м}$ ;  $S = 0,5 \text{ м}$ .

2.  $l_1 = \frac{\pi R}{3}$ ,  $S_1 = R$ ;  $l_2 = \frac{\pi R}{2}$ ,  $S_2 = R\sqrt{2}$ .

3.  $x_1 = 6,25 \text{ м}$ ;  $x_2 = 16 \text{ м}$ . 4. Модуль минимален на участке А-Б; максимален на участке В-Г.

5.  $v_{\text{max}}$  — в моменты времени  $t = 0; 2; 4$  с.  $v_{\text{min}}$  — в моменты времени  $t = 1; 3$  с. 6. 16 м.

### Контрольная работа (с. 66)

Вариант 1

1. Б. 2. Ответ зависит от масштаба фотографии.  
3.  $x_{t1} = 1$  м;  $x_{t2} = 7$  м;  $\Delta x_{2c} = 1$  м;  $\Delta x_{5c} = 5$  м;  $\frac{v_5}{v_1} = 5$ .

Вариант 2

1. В. 2. Ответ зависит от масштаба фотографии.  
3.  $x_{t1} = 8$  м;  $x_{t2} = 19$  м;  $\Delta x_{2c} = 5$  м;  
 $\Delta x_{5c} = 5$  м;  $\frac{v_6}{v_1} = \frac{1}{5}$ .

### Контрольная работа (с. 67)

Вариант 1

1. А (1 м; 1 м); В (7 м; 4 м);  $S \approx 6,7$  м;  $s = 17$  м.  
2. Ответ зависит от масштаба фотографии.  
3. Ускорение изменилось от  $\approx -1,45 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$  до 0.

Вариант 2

1. А (1 м; 3 м); В (3 м; 8 м);  $S \approx 5,4$  м;  $s = 13$  м.  
2. Ответ зависит от масштаба фотографии.  
3. Ускорение изменилось от  $+3,2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$  до 0.

### Самостоятельная работа (с. 72)

1.  $s = (v_1 + v_2) \cdot t$ ;  $s = 50$  м. Подумайте, зачем приведена высота  $H = 100$  м. 2.  $t = \frac{l}{v_0}$ ;  $t = 2$  с.

$$3. t_{\text{min}} = \frac{h}{v_2} = 25 \text{ с}; l = \frac{h}{v_2} \sqrt{v_1^2 + v_2^2} = 125 \text{ м};$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = \arctg 1,33 = 53^\circ.$$

$$4. t = \frac{l}{v_{\text{отн}}} = \frac{l}{v} = 600 \text{ с} = 10 \text{ мин.}$$

$$5. \text{Относительно аэростата: } l_1 = S_1 = \frac{gt^2}{2} = 20 \text{ м};$$

относительно Земли:

$$S_2 = -v_0 t + \frac{gt^2}{2} = 10 \text{ м}; l_2 = \frac{2v_0^2}{2g} + S_2 = 12,5 \text{ м}.$$

$$6. t_1 = \frac{L+l_1}{l_1} t_1 = 45 \text{ с}; t_2 = \frac{l_2}{v_1 + v_2} = 12 \text{ с}.$$

$$7. v_{\text{min}} = v_T \cdot \cos \alpha = v_T \frac{h}{\sqrt{h^2 + s^2}} = 1,6 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$\alpha = \arccos \frac{h}{\sqrt{h^2 + s^2}} = 37^\circ; \beta = 180^\circ - \alpha = 143^\circ.$$

### Контрольная работа (с. 73)

Вариант 1

1. В. 2. Г. 3. В. 4. Б. 5. А. 6. Б.

Вариант 2

1. Г. 2. Б. 3. В. 4. В. 5. Г. 6. А.

### Контрольная работа (с. 75)

Вариант 1

1. В. 2. Б. 3. 4  $\frac{\text{км}}{\text{ч}}$ ; 16  $\frac{\text{км}}{\text{ч}}$ . 4. 50  $\frac{\text{км}}{\text{ч}}$ .

Вариант 2

1. А. 2. Б. 3.  $\approx 30 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ , на юго-восток.

4. 5  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ , дует с запада.

### Самостоятельная работа (с. 80)

$$1. t = \frac{l_1 + l_2}{v} = \frac{800}{5} = 160 \text{ с. } 2. v_1 = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}}; v_2 = 2,5 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$x_1 = 5t \text{ (м)}; x_2 = 2,5t \text{ (м)}. 3. 65 \text{ км. } 4. v_{1x} = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$v_{2x} = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}; t = 2 \text{ с, } x = 28 \text{ м. } 5. y = 2x \text{ (м)}.$$

### Контрольная работа (с. 80)

Вариант 1

1. А. 2. А. 3. Г. 4. А. 5. В. 6. В.

Вариант 2

1. Г. 2. В. 3. Г. 4. В. 5. В. 6. А.

**Контрольная работа (с. 80)**

Вариант 1

1. 0,5 мин. 2.  $t = \frac{l - v_1 t_0}{v_1 - v_2}$ , при условии, что  $l > v_1 t_0$ .

При  $l < v_1 t_0$   $t = \frac{l}{v_1}$ . 3. 10 ч 30 мин; 60 км; 60 км.

Вариант 2

1.  $t = 1$  ч;  $s = 70$  км;  $s_{\text{отн}} = 120$  км.

2. 18 мин;  $s_1 = 4,5$  км;  $s_2 = 1,5$  км. 3.  $v_{\text{ср}} = 25 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ ;  $s = 140$  км.

**Самостоятельная работа (с. 89)**

1.  $v = v_0 + at = 10 + 0,5 \cdot 20 = 20 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ .

2.  $|a| = \frac{|v_2 - v_1|}{t} = |a| = 2 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$ . 3.  $a_x = 4 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$ ,  $s_x = 50$  м.

4.  $a_x = -2 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$ ,  $s_x = -25$  м.

5.  $x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2} = 500 + 5 \cdot 30 + \frac{1 \cdot 900}{2} = 1100$  м.

6.  $x = x_0 + v_x t + \frac{a_x t^2}{2} = 100 - 10 \cdot 2 + \frac{3 \cdot 2^2}{2} = 86$  м.

7.  $v_{0y} = 4 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ ,  $a_y = 2 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$ .

8.  $x(t) = 4 - t + \frac{t^2}{2}$  (м),  $v_x = -1 + t \left( \frac{\text{М}}{\text{с}} \right)$

9. См. рис. 1.

10. См. рис. 2.

11. См. рис. 3.

**Контрольная работа (с. 91)**

Вариант 1

1. А. 2. А. 3. Б. 4. В. 5. В. 6. В.

Вариант 2

1. Б. 2. Б. 3. Б. 4. Б. 5. Г. 6. В.

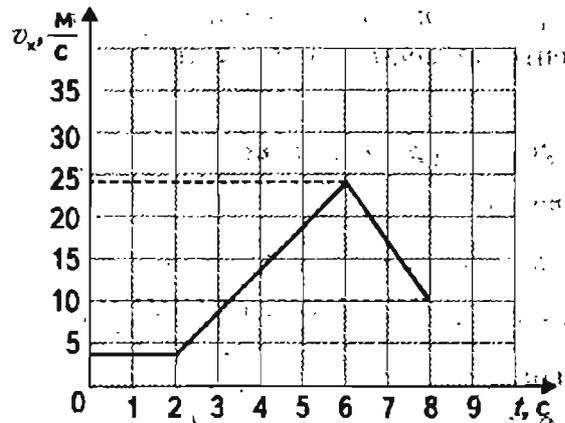


Рис. 1

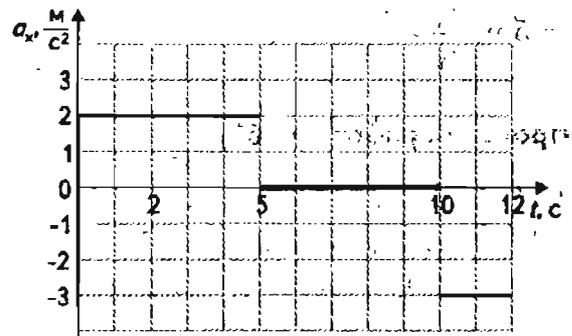


Рис. 2

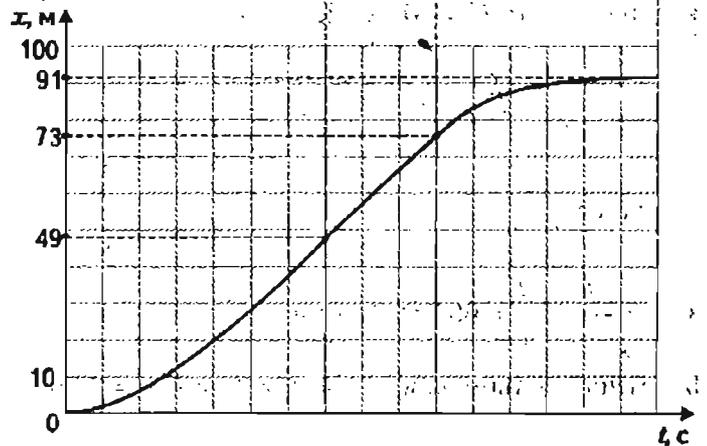
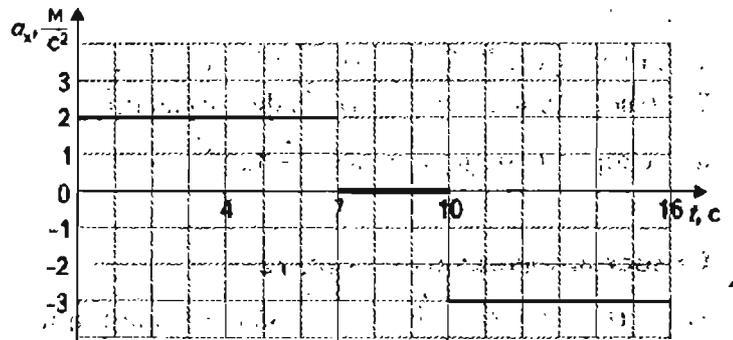


Рис. 3

**Контрольная работа (с. 92)****Вариант 1**

1.  $v_0 = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}}, a = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

2.  $4(\sqrt{7} - \sqrt{6}) \approx 0,79 \text{ с}$ . 3.  $15,6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

4.  $v_0 = -16 \frac{\text{м}}{\text{с}}, a = 8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}, v = 16 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

**Вариант 2**

1.  $0,45 \frac{\text{м}}{\text{с}}; 0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . 2. 40 с.

3.  $v_2 = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}}; s_2 = 75 \text{ м}; a_3 = -0,625 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}; t_3 = 8 \text{ с}$ .

4.  $x_0 = 10 \text{ м}; v_{0x} = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}}; a_x = -2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}; t = 2 \text{ с}; x = 14 \text{ м}$ .

**Самостоятельная работа (с. 97)**

1.  $t_1 = \sqrt{\frac{2H}{g}} = 3 \text{ с}, v = g \cdot t = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

2.  $v = \sqrt{v_0^2 + 2gh} = 25 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

3.  $H = \frac{gt^2}{2}; \frac{H}{3} = \frac{g}{2(t-1)^2} \rightarrow t = 2,37 \text{ с}; H = 27,5 \text{ м}$ .

4.  $t = \sqrt{\frac{2H}{g}}, h_2 = v_0 t + \frac{gt^2}{2} \rightarrow v_0 = \frac{h_2 - h_1}{\sqrt{\frac{2h_1}{g}}}, v_0 = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

5. Из уравнения  $h = v_0 t - \frac{gt^2}{2}$  получаются два значения:  $t_1 = 1 \text{ с}, t_2 = 5 \text{ с}$  — оба имеют физический смысл. 6. См. рис. 4.

**Контрольная работа (с. 99)****Вариант 1**

1.  $24,1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . 2. 245 м, 0 м. 3. 20 м.

4.  $8,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}; 5 \frac{\text{м}}{\text{с}}; 1,25 \frac{\text{м}}{\text{с}}; 1 \text{ с}; 8,7 \text{ м}$ .

**Вариант 2**

1.  $t = \frac{2d + g\tau^2}{2g\tau}$ . 2. 8 с; 87,4 м; 73,5 м; 83,3 м.

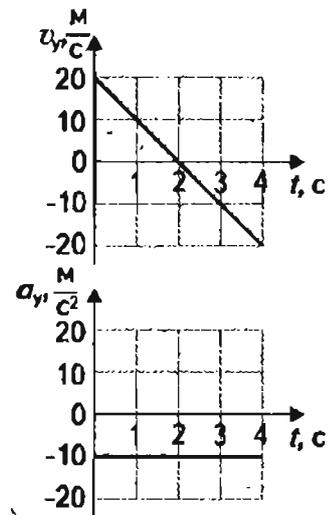


Рис. 4

3.  $\approx 9000 \text{ м}; \approx 500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . 4.  $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}; 17,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}; 14,9 \text{ м}; 3,5 \text{ с}; 34,6 \text{ м}$ .

**Самостоятельная работа (с. 104)**

1.  $v_0 = \sqrt{2gh} = 6 \frac{\text{м}}{\text{с}}; a_{\text{uc}} = \frac{v_0^2}{l} = 60 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

2.  $\frac{mv^2}{R+h} = mg, v = \sqrt{g(R+h)} = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

3.  $a_{\text{uc}} = \frac{v^2}{l} = 9,7 \cdot 10^{22} \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

4.  $a_{\text{uc}} = \frac{v^2}{R}; T = \frac{2\pi R}{v} \rightarrow$

$\rightarrow R = \frac{Tv}{2\pi}; R = 0,63 \text{ м}; a_{\text{uc}} = 5,7 \cdot 10^{15} \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

5.  $a_x = \frac{v_2 - v_1}{t} = 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}; a_{\text{uc}} = \frac{v_2^2}{R} = 6,43 \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$

$a = \sqrt{a_x^2 + a_{\text{uc}}^2} = 6,45 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

**Контрольная работа (с. 105)****Вариант 1**

1. В. 2. Б. 3. Б. 4. А. 5. Б. 6. Б.

**Вариант 2**

1. В. 2. Г. 3. В. 4. В. 5. В. 6. В.

**Контрольная работа (с. 106)**

Вариант 1

1.  $256 \frac{M}{c}, \frac{a_2}{a_1} = 1,5$ . 2.  $v = \frac{4\pi v R^2}{l} = 330 \frac{M}{c}$ .  
3. См. таблицу.

	Секундная	Минутная	Часовая
$T$	60 с	3600 с	43200 с
$\nu$	$\frac{1}{60} c^{-1}$	$\frac{1}{3600} c^{-1}$	$\frac{1}{43200} c^{-1}$
$\omega$	$0,1 c^{-1}$	$1,7 \cdot 10^{-3} c^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-4} c^{-1}$

4.  $\approx 9,8 \frac{M}{c^2}; \approx 4,2 \frac{M}{c^2}; \approx 8,5 \frac{M}{c^2}; \approx 10$  м.

Вариант 2

1.  $3,4 \cdot 10^{-2} \frac{M}{c}$ . 2.  $10,4 \frac{M}{c^2}$ . 3. Уменьшится в 2 раза.  
4.  $\approx 24$  м.

**Самостоятельная работа (с. 113)**

1. Вперед. 2. а) можно, б) нельзя, в) нельзя.  
3. У первого; в 2раза. 4. От отношения масс.  
5. На остановку грузовика. 6. 50 Н. 7. 0 Н. 8. 0 Н.  
9. Равнодействующую этих сил найти нельзя, так как они приложены к разным телам.

**Контрольная работа (с. 114)**

Вариант 1

1. Б. 2. Б. 3. В. 4. А. 5. В. 6. Б. 7. Г.

Вариант 2

1. А. 2. Б. 3. А. 4. А. 5. Б. 6. Б. 7. Д.

**Самостоятельная работа (с. 121)**

1. Нет. 2. Нет. 3.  $a = 1,5 \frac{M}{c^2}$ . 4.  $F = 150$  Н.  
5. См. рис. 5.  
6. См. рис. 6.

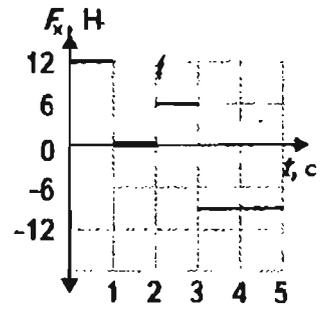


Рис. 5

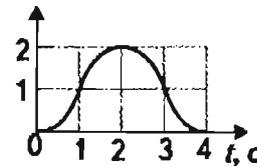
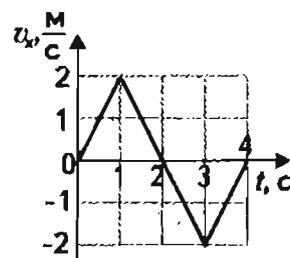


Рис. 6

7.  $v_0 = 2,5 \frac{M}{c}$

8.  $a = \frac{F}{m_1 + m_2}; a = 1 \frac{M}{c^2}; F_{y1} = F - m_1 a = 3$  Н

Изменится, станет равной  $F_{y2} = F - m_2 a = 2$  Н.

**Контрольная работа (с. 122)**

Вариант 1

1. А. 2. Г. 3. А. 4. Г. 5. Г.

Вариант 2

1. А. 2. Г. 3. В. 4. Д. 5. В.

**Контрольная работа (с. 123)**

Вариант 1

1.  $2,9 \cdot 10^5$  Н. 2. 12 кг. 3. 0;  $\approx 3,3$  Н; -10 Н. 4. 150 кг.

Вариант 2

1. 0,75 кН. 2. 1 кН. 3. 4 Н; 0; 2 Н. 4.  $v_x = 1,5t$ .**Самостоятельная работа (с. 127)**

1. Нет. Силы приложены к разным телам. 2. Сила тяжести гири и сила реакции опоры (стола); сила тяжести стола и сила реакции опоры (пола). 3. 200 Н. 4. Да. 5. Да. 6. Нет, да. 7. Да. 8. Нет. 9. Модули сил равны. 10. Нет. 11. Да; да; да; да; да.

**Самостоятельная работа (с. 135)**

1.  $M_C = \frac{4\pi^2 R^3}{GT^2} \approx 2 \cdot 10^{30}$  кг.

2.  $M_M = \frac{4\pi^2 R^3}{GT^2} \approx 6,6 \cdot 10^{23}$  кг.

3.  $l = 54R_3 = 345600$  км; двигатели работают, вырабатывая струю газов в сторону Луны, чтобы создать силу, направленную к Земле.

4.  $F = \frac{4}{3}\pi G \rho m(R-h)$ . 5.  $\Delta P = \frac{m4\pi^2 R}{T^2} = 0,034$  Н.

6.  $T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}} \approx 1,4$  Н.

**Контрольная работа (с. 135)**

Вариант 1

1. В. 2. Г. 3. В. 4. А. 5. А. 6. В.

Вариант 2

1. В. 2. Д. 3. Б. 4. Е. 5. В. 6. Д.

**Контрольная работа (с. 137)**

Вариант 1

1.  $T = \sqrt{\frac{3\pi}{G\rho}} \approx 1,2 \cdot 10^{-3}$  с.

2.  $a_n = \frac{g}{60^2} \approx 0,0027 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . 3.  $T = \sqrt{\frac{4\pi^2 R}{g}} \approx 4 \cdot 10^2$  с.

Вариант 2

1.  $\alpha = \arctg \frac{\frac{4\pi^2}{T^2} R \cos \varphi \sin \varphi}{g - \left(\frac{4\pi^2}{T^2}\right) R \cos^2 \varphi} \approx 0,0017$  рад  $\approx 6'$ .

2.  $a = \frac{g}{4} = 2,45 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ . 3.  $g_n = G \frac{M_n}{R_n^2} \approx 1,6 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

**Самостоятельная работа (с. 143)**

1. При  $\omega \leq \sqrt{\frac{g}{l}}$   $\varphi_1 = 0$ ; при  $\omega \geq \sqrt{\frac{g}{l}}$   $\varphi_2 = \arccos \frac{g}{\omega^2 l}$ .

2.  $F = \frac{4m_1 m_2}{m_1 + m_2} g \approx 24$  Н.

3.  $v = \sin \alpha \sqrt{\frac{gl}{\cos \alpha}}$ ;  $T = 2\pi \sqrt{\frac{l \cos \alpha}{g}}$ .

4.  $F_H = 3mg \cos \alpha$ ;  $F_{\min} = 3mg \approx 6$  Н.

5.  $v_1 = \frac{2g(2m_1 - m_2)t}{4m_1 + m_2}$ ;  $v_2 = 0,4gt$ ;  $v_3 = \text{const}$ ;

$v_4 = -2gt$ ;  $v_5 = gt$ .

6.  $a = \frac{g \sin \frac{\alpha}{2} (m_2 - m_1)}{m_1 + m_2} \approx 2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

7.  $P = m(g+a) = 3180$  Н;  $k = \frac{(g+a)}{g} = 4,06$ .

8.  $P = m \left( g + \frac{v_1 - v_2}{t} \right) = 2440$  Н;

$k = \frac{g + \frac{v_1 + v_2}{t}}{g} = 3,6$ .

**Контрольная работа (с. 144)**

Вариант 1

1. В. 2. А. 3. А. 4. Б. 5. В. 6. Б.

Вариант 2

1. Г. 2. Г. 3. В. 4. А. 5. В. 6. В.

**Контрольная работа (с. 145)**

Вариант 1

1. Г. 2. В. 3. В. 4. А. 5. А. 6. Б.

Вариант 2

1. В. 2. В. 3. А. 4. Г. 5. В. 6. В.

**Решить самостоятельно (с. 153)**

1.  $\alpha = \arctg \frac{v^2}{Rg} = \arctg 4 \approx 76^\circ$

2. Система будет находиться в покое; следовательно  $a = 0, F_H = m_2 g = 2 \text{ Н}$

3.  $\alpha_0 = \arctg 0,6 \approx 31^\circ$ . (См. рис. 7).

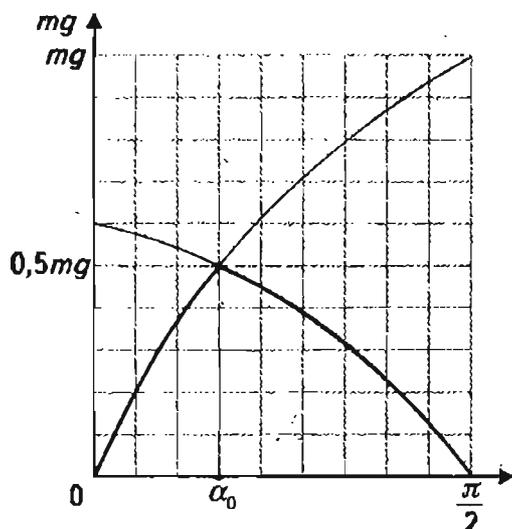


Рис. 7

4.  $a > \mu g \approx 5 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$

5.  $F_H = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (\mu + 1) g \approx 7,3 \text{ Н}$ ; сила при перемене грузов не изменится, так как выражение симметрично.

**Контрольная работа (с. 153)**

Вариант 1

1. Б. 2. Б. 3. Г. 4. В. 5. Г. 6. А.

Вариант 2

1. Б. 2. В. 3. Г. 4. В. 5. Г. 6. В.

**Контрольная работа (с. 155)**

Вариант 1

1.  $\mu = \text{tg} \alpha - \frac{2L}{gt^2 \cos \alpha} \approx 0,12$

2.  $v_2 = \frac{v_1 g}{g - a} = 12 \frac{\text{М}}{\text{с}}$

3.  $a = \frac{F(\mu \sin \alpha + \cos \alpha) - \mu mg}{m} \approx 2,7 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$

Вариант 2

1.  $\mu = \frac{2m}{M} \left( 1 - \frac{1}{k} \right) \approx 0,2$

2.  $a = \frac{m_3 - m_1 - \mu m_2}{m_1 + m_2 + m_3} g = 2,5 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$

$F_{H1} = m_1 (g + a) = 1,25 \text{ Н}; F_{H2} = m_3 (g - a) = 2,25 \text{ Н}$

3.  $\alpha_0 = \arctg \mu = 11^\circ; F_{\text{тр}} = \frac{\mu mg}{\sqrt{1 + \mu^2}} = 157 \text{ Н}$

**Самостоятельная работа (с. 162)**

1.  $F_H = 0,29 \text{ Н}; N = 1 \text{ Н}$ . 2.  $\mu = 0,87$ .

3.  $F_{AB} = F_{CD} = \frac{mg}{2 \sin \alpha}; F_{BC} = \frac{mg}{2} \text{ctg} \alpha$

**Контрольная работа (с. 163)**

Вариант 1

1.  $\approx 1600 \text{ Н}; \approx 3400 \text{ Н}$ . 2.  $\approx 5,8 \text{ Н}; \approx 2,9 \text{ Н}$ .

3.  $F_{\text{прав}} = 120 \text{ Н}; F_{\text{лев}} = 160 \text{ Н}$ .

Вариант 2

1.  $\approx 28,5 \text{ Н}; \approx 10 \text{ Н}$ . 2.  $\approx 940 \text{ Н}; \approx 1060 \text{ Н}$ .

3. 0,4 кг.

**Контрольная работа (с. 164)**

Вариант 1

1.  $F_{H1} = \frac{7}{12} mg = 700 \text{ Н}; F_{H2} = \frac{1}{3} mg = 400 \text{ Н}$ ;

$$F_{\text{нз}} = \frac{1}{12} mg = 700 \text{ Н.}$$

$$2. \alpha = \arcsin \frac{r^2 l}{R(R^2 - r^2)} = 16^\circ.$$

$$3. x = \frac{m_2 \left( \frac{L}{2} + R_2 \right) - m_1 \left( \frac{L}{2} + R_1 \right)}{m_1 + m_2 + m_3}.$$

$$4. \approx 0,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Вариант 2

$$1. F_{\text{min}} = \frac{mg(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)}{\mu} = 7 \text{ Н.}$$

$$2. F_{\text{н}} = \frac{0,4m_2 g - 0,1m_1 g}{0,3} = 2 \text{ Н.}$$

$$3. x_1 = \frac{R}{6}, x_2 = \frac{R}{4(4\pi - 1)}. \quad 4. \approx 0,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

### Самостоятельная работа (с. 170)

$$1. 16 \frac{\text{кгм}}{\text{с}}; 32 \frac{\text{кгм}}{\text{с}}. \quad 2. 10 \cdot \sqrt{2} \frac{\text{кгм}}{\text{с}}; 20 \frac{\text{кгм}}{\text{с}}; 0 \frac{\text{кгм}}{\text{с}}.$$

$$3. \Delta p = 3 \frac{\text{кгм}}{\text{с}}. \quad 4. \Delta p = m\sqrt{2gh} \approx 20 \frac{\text{кгм}}{\text{с}}, \text{ вектор } \Delta \vec{p} \text{ направлен вниз.}$$

### Контрольная работа (с. 170)

Вариант 1

1. Б. 2. В. 3. Г. 4. В. 5. Г. 6. А.

Вариант 2

1. Б. 2. Б. 3. В. 4. Г. 5. Б. 6. А.

### Самостоятельная работа (с. 177)

$$1. v = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

$$2. v_0 = \frac{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}}{2} = 250 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

### Контрольная работа (с. 177)

Вариант 1

1. В. 2. Б. 3. Б. 4. В. 5. Б. 6. А.

Вариант 2

1. А. 2. Б. 3. А. 4. Б. 5. В. 6. А.

### Контрольная работа (с. 179)

Вариант 1

1.  $v_{1x} = \frac{mv - m_2 v_2}{m_1} = -150 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Знак « $\rightarrow$ » означает, что скорость  $\vec{v}_1$  направлена в сторону, противоположную начальной скорости.

2.  $v_t = \frac{m_q v}{m_q + m_t} = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Скорость тележки направлена противоположно скорости человека.

$$3. v'_x = \frac{(m_1 + m_2)v_1 - m_2 v_2 \cos \alpha}{m_1} = 4,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Вариант 2

$$1. \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{m(a+g)}{u} = 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

$$2. S = \frac{v^2}{2\mu g(1+n)^2} = 0,5 \text{ м.}$$

$$3. l = \frac{v_0^2}{g} \left( 1 + \frac{M}{m} \right) \sin 2\alpha; v_{\text{min}} \text{ при } \alpha = 45^\circ;$$

$$v_{\text{min}} = \sqrt{\frac{lg}{1 + \frac{M}{m}}} \approx 3,53 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

### Задачи для самостоятельного решения

#### Механическая работа и мощность (с. 191)

$$1. A = mgl \cdot \sin \alpha = 175 \text{ кДж.}$$

$$2. A_1 : A_2 = 1 : 5. \quad 3. A = \frac{kx^2}{2} = 1,8 \text{ Дж.}$$

$$4. A = m(g+a)h \approx 1,1 \text{ кДж.}$$

$$5. A = m \left( g + \frac{2h}{t^2} \right) h \approx 3,32 \text{ кДж.}$$

#### Кинетическая и потенциальная энергия (с. 191)

$$1. A = Fh = 300 \text{ Дж}; \Delta E_{\text{п}} = mgh = 147 \text{ Дж};$$

$$\Delta E_{\text{к}} = A - \Delta E_{\text{п}} = 153 \text{ Дж.}$$

$$2. A = m \left( g + \frac{2h}{t^2} \right) h = 600 \text{ Дж};$$

$$\Delta E_k = A - mgh = 100 \text{ Дж}.$$

$$3. A_N = 0; A_{mg} = mgl \cdot \sin \alpha = 7 \cdot 10^4 \text{ Дж};$$

$$A_{\text{тр}} = -\frac{\mu mgl}{\cos \alpha} = -3,6 \cdot 10^3 \text{ Дж};$$

$$\Delta E_k = A - A_{\text{тр}} = 6,4 \cdot 10^4 \text{ Дж}.$$

$$4. N_{\text{ср}} = \frac{mv^2}{2t} \approx 411 \text{ Вт}. \quad 5. t = \frac{mgH}{N} = 5,5 \text{ с}.$$

**Контрольная работа (с. 191)**

Вариант 1

1. В. 2. Б. 3. Г. 4. Г. 5. В. 6. Б. 7. В. 8. Г. 9. Б.

Вариант 2

1. В. 2. Г. 3. А. 4. Б. 5. Г. 6. Г. 7. В. 8. В. 9. Б.

**Контрольная работа (с. 193)**

Вариант 1

$$1. A = \frac{mgl(\mu_1 + \mu_2)}{2} \approx 294 \text{ Н}$$

$$2. m = \frac{N}{vg} = 1,02 \cdot 10^4 \text{ кг}.$$

$$3. A_1 = 0,0125 \text{ Дж}; A_2 = 0,0375 \text{ Дж}; A_1 : A_2 = 1 : 3.$$

$$4. \alpha = \sqrt{2 \left( \frac{Fh}{m} - gh \right)} = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Вариант 2

$$1. N = \frac{m \left( g + \frac{2s}{t^2} \right) s}{t} = 88,5 \text{ кВт}.$$

$$2. v = \frac{N}{mg(\sin \alpha + \mu \cos \alpha)} = 6 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

$$3. A = 2k\Delta l^2 = 8 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}.$$

$$4. A_{\text{ср}} = \frac{mv^2}{2} - \left( mgH + \frac{mv_0}{2} \right) = -1,2 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

**Задачи для самостоятельного решения  
Закон сохранения энергии (с. 204)**

$$1. h = \frac{5}{3} R = 1 \text{ м}; H_{\text{min}} = \frac{5}{2} R = 1,5 \text{ м}.$$

$$2. v_1 = \sqrt{5gl} = 4,47 \frac{\text{м}}{\text{с}}; v_2 = 2\sqrt{gl} = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

$$3. v = \sqrt{3gl} = 3 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

$$4. v = \sqrt{\frac{k}{m} x^2 + 2gh} = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}} \text{ во всех случаях}.$$

$$5. h = \frac{R}{3} = 0,1 \text{ м}. \quad 6. v = \sqrt{\frac{F}{mx_1}} x \approx 22 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

**Упругий и неупругий удар (с. 205)**

1.  $v_1 = \frac{(1-k)v}{1+k}, v_2 = \frac{2v}{1+k}$ ; при  $k = 1$  шары обмениваются импульсами; при  $k \gg 1, v_1 = -v, v_2 = 0$ ;

при  $k \ll 1, v_1 = v, v_2 = 2v; \frac{\Delta E}{E} = \frac{4k}{(1+k)^2}$ .

$$2. 90^\circ. \quad 3. u = 2v = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad 4. v + 2u; v - 2u.$$

**Контрольная работа (с. 205)**

Вариант 1

1. Г. 2. Г. 3. Г. 4. Б. 5. В. 6. Г. 7. В. 8. А. 9. В. 10. В. 11. Г. 12. Г.

Вариант 2

1. В. 2. Г. 3. А. 4. Б. 5. Б. 6. Г. 7. Б. 8. Б. 9. Г. 10. В. 11. А. 12. В.

**Контрольная работа (с. 208)**

Вариант 1

$$1. 74 \text{ Н}. \quad 2. v = \frac{gt}{\sqrt{2}} \approx 20,9 \frac{\text{м}}{\text{с}}; E_k = \frac{mg^2 t^2}{4} = 432 \text{ Дж}.$$

$$3. E_K = \frac{m(v_0^2 + g^2 t^2)}{2} = 4864 \text{ Дж.}$$

$$4. \sqrt{4v_0^2 + 2gh} = 11 \frac{\text{М}}{\text{с}}.$$

Вариант 2

$$1. H = \frac{(\sqrt{2gh} + 2u)^2}{2g} = 5 \text{ м. } 2. H = 9h.$$

$$3. \Delta v = \sqrt{G \frac{m}{R} (\sqrt{2} - 1)^2} + 2G \frac{m}{R} - \sqrt{G \frac{m}{R}} = 10 \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

$$4. u = \frac{m_1 v_1}{m_2} = 2 \frac{\text{М}}{\text{с}}, v_2 = v_1 \sqrt{\frac{m_2 - m_1}{m_2}} = 9 \frac{\text{М}}{\text{с}}.$$

### Самостоятельная работа (с. 222)

$$1. x_m = 15 \text{ см}; T = 20 \text{ с}; \nu = 0,05 \text{ Гц};$$

$$x = -15 \sin \frac{\pi}{10} t \text{ (см).}$$

$$2. \omega = 5\pi \text{ с}^{-1}; \varphi = 5\pi t + \frac{\pi}{4}; \varphi_0 = \frac{\pi}{4} \text{ рад.}$$

$$3. x_1 = 1 \text{ см}; x_2 = \sqrt{3} \text{ см}; x_3 = -1 \text{ см.}$$

$$4. t = \frac{T}{6}. \quad 5. \text{ Колебание будет гармоническим.}$$

6. Амплитуда результирующего колебания будет равна нулю.

### Контрольная работа (с. 223)

Вариант 1

1. А. 2. А. 3. Г. 4. В. 5. Б. 6. В. 7. Д. 8. Б. 9. В. 10. В.

Вариант 2

1. В. 2. В. 3. Г. 4. Б. 5. В. 6. В. 7. Е. 8. Г. 9. А. 10. В.

### Контрольная работа (с. 226)

Вариант 1

$$1. x = 5 \sin 4\pi t.$$

$$2. x_M = 2; \omega = 2\pi; v_{\max} = 4\pi \frac{\text{см}}{\text{с}}; a_{\max} = 8\pi^2 \frac{\text{см}}{\text{с}^2}.$$

$$3. T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{1}{400}} = \frac{1}{20} \text{ с.}$$

4. См. рис. 8.

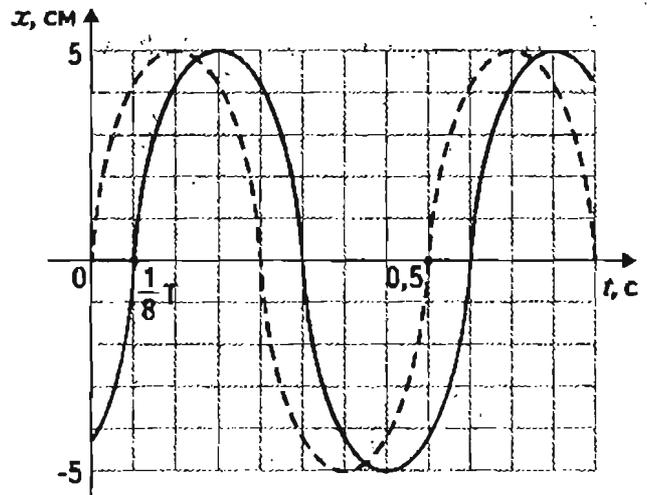


Рис. 8

Вариант 2

$$1. x = 3 \sin 10\pi t.$$

$$2. x_m = 5 \text{ см}; \omega = 4\pi \frac{1}{\text{с}}; v_m = 20\pi \frac{\text{см}}{\text{с}}; a_m = 80\pi \frac{\text{см}}{\text{с}^2}.$$

$$3. T = \frac{\pi}{10} \text{ с. } 4. \text{ См. рис. 9.}$$

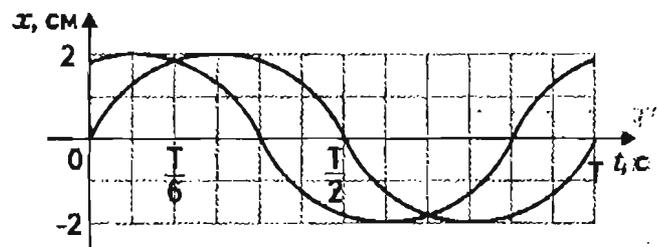


Рис. 9

### Самостоятельная работа (с. 231)

1. Маятниковые часы на Луне будут идти в 2,46 раз медленнее.

$$2. l = \frac{T^2 g}{4\pi^2}; l_{\text{земля}} = 24,9 \text{ см}; l_{\text{луны}} = 4,1 \text{ см.}$$

$$3. T = 2\pi \sqrt{\frac{m(k_1 + k_2)}{k_1 k_2}}.$$

4. Период уменьшится в 2 раза.

**Контрольная работа (стр. 232)**

Вариант 1

1. В. 2. Б. 3. Б. 4. А. 5. А. 6. А. 7. А. 8. В. 9. А.

Вариант 2

1. Б. 2. А. 3. В. 4. А. 5. Б. 6. А. 7. А. 8. А. 9. Г.

**Контрольная работа (с. 232)**

Вариант 1

1.  $x_m = \frac{M+m}{k}g$ . 2.  $v = \sqrt{\frac{g}{4\pi^2 x_m}} = 10 \text{ Гц}$ .

3.  $T = 1,1 \text{ с}$ .

Вариант 2

1.  $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ . 2.  $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{2g}}$ .

3.  $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g^2 + a^2}}$ .

**Самостоятельная работа (с. 240)**

1.  $0; \frac{3}{2}\pi; -\pi$ . 2. 0. 3.  $v_{\omega \ll \omega_0} = 0 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ ;  $v_{\text{max}} = \frac{F_0}{\beta} = 10 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ ;

$v_{\omega \gg \omega_0} = 0 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ .

**Контрольная работа (с. 240)**

Вариант 1

2.  $\omega_{\text{рез}} = 20 \frac{\text{рад}}{\text{с}} = 20 \frac{1}{\text{с}}$ . 4.  $v = 2,7 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ .

5.  $b_{\omega \ll \omega_0} = 2,5 \text{ мм}$ ;  $b_{\text{max}} = 16 \text{ см}$ ;  $b_{\omega \ll \omega_0} \rightarrow 0$ .

Вариант 2

2.  $m = 2 \text{ кг}$ . 4.  $v = 68 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ .

5.  $S_1 = 0,2 \cos\left(\pi t + \frac{\pi}{4}\right) \text{ м}$ ;  $S_2 = 31,8 \cos\left(\pi t + \frac{3\pi}{2}\right) \text{ м}$ .

**Самостоятельная работа (с. 254)**

1. Только в твердых телах. 2. Жидких, твердых, газообразных. 3.  $v = 2,5 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ .

4.  $P = 10^{-4} \cos 880\pi(t - 0,1) \text{ Па}$ . 5.  $v = 400 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ .

6. Нет. 7. Да.

**Контрольная работа (с. 255)**

Вариант 1

1. Б. 2. Г. 3. Б. 4. В. 5. Г. 6. А.

Вариант 2

1. В. 2. Г. 3. А. 4. А. 5. В. 6. А.

**Контрольная работа (с. 256)**

Вариант 1

1. Влево. 2. Вниз. 3. Нет. 4. Комар.

Вариант 2

1. Образуется ударная волна. 2. 740 м. 3. Уменьшится в 2 раза. 4.  $v = 2 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ .

**Молекулярная физика.  
Термодинамика**

**Самостоятельная работа 2.1 (с. 267)**

2.  $\approx 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$ . 3.  $\approx 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$ ; лучинка будет двигаться в сторону воды. 4. б)  $2 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$ ; в)  $2 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$ .

**Самостоятельная работа 2.2 (с. 268)**

1.  $\approx 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$ . 2.  $40 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ ; мыльный раствор.

**Самостоятельная работа 3.1 (с. 268)**

1.  $\approx 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . 2.  $73 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ .

**Самостоятельная работа 3.2 (с. 268)**

2.  $\approx 9,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

**Самостоятельная работа 4.1 (с. 268)**

3.  $\approx 0,2$  кг.

**Самостоятельная работа 5.1 (с. 269)**

1. 1)  $415 \cdot 10^9$  Па; 2) вольфрам; 3)  $\sigma = 10^9$  е, Па.

2.  $E_1 = 415 \cdot 10^9$  Па — изготовлен из вольфрама;

$E_2 = 3 \cdot 10^9$  Па — изготовлен из платины

3. а)  $10 \cdot 10^9$  Па; б) изготовлен из льда при  $t = -4$  °С; в)  $\sigma = 10^{10}$  е, Па.

**Самостоятельная работа 5.2 (с. 270)**

1.  $20 \cdot 10^9$  Па. 2.  $12 \cdot 10^9$  Па — образец изготовлен из хлопка;  $\sigma = 12 \cdot 10^9$  е, Па.

**Контрольная работа 3 (с. 270)**

Вариант 1

2.  $\approx 3,2 \cdot 10^{-3}$  Н. 3.  $49 \cdot 10^9$  Па — образец изготовлен из гранита.

Вариант 2

2.  $1,6 \cdot 10^{-3}$  Н. 3.  $10 \cdot 10^9$  Па — образец изготовлен из льда при  $t = -4$  °С.

**Самостоятельная работа 2.1 (с. 284)**

1.  $2,7 \cdot 10^4$  Дж. 2.  $20$  °С. 3.  $1292$  Дж. 4.  $\approx 164$  кДж.

5.  $\approx 4,7 \cdot 10^{11}$  Дж. 6.  $135$  МДж.

**Самостоятельная работа 2.2 (с. 285)**

2.  $3,6$  кДж. 3.  $68,4$  кДж.

**Самостоятельная работа 3.1 (с. 285)**

2.  $0,3$  кг. 3.  $3$  м<sup>3</sup>;  $3 \cdot 10^3$  л. 4. 4)  $\approx 5,2$  МДж.

6. 4)  $\approx 62$  кДж.

**Самостоятельная работа 3.2 (с. 286)**

2.  $\approx 1,1$  МДж. 3. 4)  $188,4$  кДж. 4. 3)  $\approx 473$  кДж.

**Самостоятельная работа 4.1 (с. 287)**

1.  $418$  МДж. 2.  $\approx 1,7$  МДж. 4. 1) Потреблено  $\approx 2,2$  МДж — достаточно. 2) Потреблено  $\approx 3,7$  МДж

— достаточно. 5. Потреблено  $\approx 1$  МДж — достаточно. 6.  $1,26$  г.

**Самостоятельная работа 4.2 (с. 287)**

1.  $26,8 \cdot 10^9$  Дж. 2.  $2$  кг. 3.  $\approx 173$  МДж.

**Контрольная работа 2 (с. 288)**

Вариант 1

2. 4)  $\approx 3,2$  МДж.

Вариант 2

2. 4)  $\approx 3,2$  МДж.

**Контрольная работа 3 (с. 289)**

Вариант 1

2. 4)  $\approx 3$  МДж.

Вариант 2

2. 4)  $243,5$  кДж.

**Самостоятельная работа 1.1 (с. 299)**

1.  $15 \cdot 10^{22}$ . 2.  $2,2$  кг. 3.  $7 \cdot 10^{-3}$  кг. 4.  $18 \cdot 10^{26}$ .

5.  $\approx 10^{20}$ . 6.  $N_{Al} \approx N_{Ag}$ .

**Самостоятельная работа 1.2 (с. 299)**

1.  $\approx 5,3 \cdot 10^{-26}$  кг. 2.  $200$  моль. 3.  $0,52$  кг. 4.  $m_{pb} > m_{sn}$  в  $1,7$  раза.

**Самостоятельная работа 2.1 (с. 300)**

1.  $5 \cdot 10^{-24}$  Дж. 2.  $\approx 1,2 \cdot 10^{26}$  м<sup>-3</sup>;  $n_1 = 6 \cdot 10^{25}$  м<sup>-3</sup>.

3.  $p_1 = p_2$ . 4.  $\approx 2,7 \cdot 10^{25}$  м<sup>-3</sup>. 5.  $p_2 = 4p_1$ .

6.  $\approx 2,7 \cdot 10^{24}$  м<sup>-3</sup>.

**Самостоятельная работа 2.2 (с. 300)**

1.  $3 \cdot 10^{27}$  м<sup>-3</sup>. 2.  $2 \cdot 10^5$  Па. 3.  $\approx 4 \cdot 10^4$  Па. 4.  $394 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

**Самостоятельная работа 3.1 (с. 300)**

3.  $13$  кПа. 4.  $\approx 3,8 \cdot 10^6$  Па. 5.  $\langle v \rangle \approx 12,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Так как средняя квадратичная скорость меньше

второй космической скорости, то все атомы водорода не смогут улететь с поверхности Солнца.

6.  $\approx 2,2$ . 7.  $\approx 1,4 \cdot 10^7$  Па. 8. 2. 9. 20 м.

10.  $\approx 1,4 \cdot 10^6$  Па. 11. В 7,7 раза. 12.  $\omega = 2\sqrt{\frac{2pS}{3ml}}$

**Самостоятельная работа 3.2 (с. 301)**

2.  $\approx 500 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ . 4.  $\approx 65 \text{ м}^3$ . 5. 4 моль. 6.  $2,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ .

7.  $4900 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ .

**Контрольная работа 1 (с. 302)**

Вариант 1

1.  $2,14 \cdot 10^5$  Па. 2. Уменьшится в 2 раза.

Вариант 2

1. 0,8 г. 2. Уменьшится в 5 раз.

**Контрольная работа 2 (с. 303)**

Вариант 1

1.  $\approx 2,3 \cdot 10^5$  Па. 2.  $\frac{m_2}{m_1} = 0,76$ . 3.  $6,75 \cdot 10^5$  Па.

4.  $\approx 2,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

Вариант 2

1.  $\approx 15 \cdot 10^{26}$ . 2.  $\approx 560 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ . 3.  $p_1 = 1,2$  МПа.

**Самостоятельная работа 1.1 (с. 310)**

2.  $\approx 4,7 \cdot 10^5$  Дж. 3. 320 Дж. 4.  $\approx 9,9\%$ . 5.  $\approx 5,7$  кДж.

6. 120 Дж. 7. а) Наименьшая температура — состояние 2; наибольшая температура — состояние 4; одинаковые температуры — состояния 1 и 3. б)  $A_{14} = A_{23} = 0$ . 8.  $\approx 20,6$  кДж.

**Самостоятельная работа 1.2 (с. 310)**

1. 4 моль. 2.  $-12 \cdot 10^6$  Дж. 3.  $\approx 18,7$  кДж.

4.  $A_{H_2} = 12A_{O_2}$ . 6. а)  $A_{123} > A_{143}$ ; б)  $A_{123} > A_{143}$  в 3 раза.

**Самостоятельная работа 2.1 (с. 311)**

1.  $10^4$  Дж.  $\Delta U > 0$ . Т. к.  $\Delta U \sim \Delta T$ , то температура газа увеличилась (газ нагрелся). 2.  $A = 0$ ;  $Q = 525$  Дж.

4. 1) 1–2 — изобарное расширение (нагревание); 1–3 — изотермическое расширение; 1–4 — адиабатное расширение; 1–5 — изохорное охлаждение.

2)  $A_{15} = 0$ . 3)  $12 \cdot 10^5$  Дж. 4)  $4,8 \cdot 10^6$  Дж. Т. к.

$\Delta U > 0$ , то газ нагрелся. 7.  $\frac{A_{1234}}{Q_{1234}} = 0,74$ .

**Самостоятельная работа 2.2 (с. 312)**

1.  $35 \cdot 10^6$  Дж. Т. к.  $\Delta U > 0$ , то газ нагрелся.

2.  $4 \cdot 10^7$  Дж. 3. 2)  $6 \cdot 10^3$  Дж.

4. 3 МДж. Т. к.  $\Delta U > 0$ , то газ нагрелся.

5.  $\Delta U = 4,8$  МДж. Т. к.  $\Delta U > 0$ , то газ нагрелся.

6.  $A = 0$ ;  $\Delta U = 2493$  Дж.

**Самостоятельная работа 3.1 (с. 313)**

1.  $\approx 61\%$ . 2.  $T_1 = 423$  К;  $Q_2 = 7$  кДж. 3.  $\approx 40\%$ ;

$3 \cdot 10^4$  Дж. 4.  $\approx 913$  К. 5. 14,5.

**Самостоятельная работа 3.2 (с. 313)**

1. 75%. 2.  $\approx 1,2 \cdot 10^4$  Дж. 3. 45,5 кДж.

4.  $\approx 505$  К = 232 °С.

**Самостоятельная работа 4 (с. 313)**

1.  $2 \cdot 10^5$  Дж. 2. 33 км. 3. 0,89. 4. 100 °С. 5. 0 °С; 575 г воды и 825 г льда. 6. 1,23 кг.

**Самостоятельная работа 5 (с. 314)**

2.  $A = RT_3 + RT_1 - 2R\sqrt{T_1 \cdot T_3}$ .

3.  $A = R \frac{p_2 - p_1}{2} \left( \frac{T_2}{p_2} - \frac{T_1}{p_1} \right)$ . 4.  $\approx 44\%$ .

5.  $Q = \frac{5}{2}(m_1g + p_0S)vl$ .

6.  $A = \frac{R}{2}(T_2 - T_1)\sqrt{\frac{T_2}{T_1} - 1}$ .

7.  $\eta = 1 - x^{\gamma-1}$ . 8.  $T_{max} = 568 \text{ К}$ . 9.  $\frac{9}{8} T_0$ .

### Контрольная работа 1 (с. 316)

#### Вариант 1

1.  $45 \cdot 10^3 \text{ Дж}$ . 2. 3 кДж. 3.  $-3 \cdot 10^4 \text{ Дж}$ . Т. к.  $\Delta U < 0$ , то газ охладился. 4.  $A_{123} > A_{143}$ . Наименьшая температура соответствует состоянию 4.

#### Вариант 2

1.  $\approx 67\%$ . 2.  $\approx 5 \text{ кДж}$ . 3.  $\approx 125 \text{ кДж}$ .

### Контрольная работа 2 (с. 316)

#### Вариант 1

1.  $\approx 5 \cdot 10^{25}$ . 2.  $\eta = 30\%$ ;  $T_1 = 400 \text{ К}$ . 3.  $A \approx 4 \text{ кДж}$ ;  $Q \approx 8,6 \text{ кДж}$ . 4.  $\approx 83\%$ .

#### Вариант 2

1. 480 Дж. 2.  $\eta = 23\%$ ;  $Q_2 \approx 46 \text{ кДж}$ . 3.  $A \approx 6,9 \text{ кДж}$ ;  $\Delta T \approx 75,3 \text{ К}$ . 4. 80%.

### Итоговый тест (с. 317)

#### Вариант 1

1. А. 2. Б. 3. Б. 4. А. 5. А. 6. Б. 7. А. 8. Г. 9. Б. 10. Б. 11. В. 12. В. 13. Г. 14. Г. 15. В. 16. Б. 17. В. 18. Б. 19. В. 20. Г.

#### Вариант 2

1. В. 2. Г. 3. Б. 4. Б. 5. Г. 6. В. 7. В. 8. В. 9. Б. 10. Б. 11. В. 12. Б. 13. А. 14. В. 15. Г. 16. В. 17. В. 18. Б. 19. А. 20. В.

## Электростатика и ПОСТОЯННЫЙ ТОК

### Самостоятельные работы (с. 332)

1.  $1,5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ . 2.  $+10^{-9} \text{ Кл}$ . 3.  $+4 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ . 4.  $+3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ . 5.  $+1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ . 6.  $7,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ ;

$2,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ . 7.  $\approx 4 \cdot 10^{10}$  электронов переместилось с отрицательно заряженного шара на положительно заряженный. 8.  $1,56 \cdot 10^8 \frac{\text{частиц}}{\text{с}}$ .

9.  $+10^{-8} \text{ Кл}$ ;  $-2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ ;  $+4 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ ;  $-0,6 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ ;  $+1,2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ ;  $+2,4 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ .

10. В 100 раз. 11. Уменьшится в 9 раз.

12.  $10^{-6} \text{ Н}$ ;  $5 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$ . 13. б). 14. При  $R = 0,5 \text{ м}$  — 1,8 Н; при  $R = 0,02 \text{ м}$  нельзя рассчитывать по закону Кулона. 15.  $\approx 0,18 \text{ м}$ . 16.  $+0,4 \text{ мкКл}$ . 17. 16 Н. 18.  $+3 \cdot 10^{-5}$  и  $+2 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$ . 19.  $6,7 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$ .

20. 3,3 см. 21. 0,9 Н, будут отталкиваться. 22. Увели-

чится на 12,5%. 23.  $q_1 q_2 < \frac{(q_1 + q_2)^2}{4}$ . 24. а) 3 Н;

б) 3 Н; в) 3 Н; г) 1 Н. 25. а) 0; б) 0; в) длина вектора — 2 см, направлен по медиане от вершины с зарядом  $-q$ .

26. а)  $2\sqrt{2} \text{ Н}$  — направлена к середине стороны 1–2; б)  $2\sqrt{2} \text{ Н}$  — направлена к середине стороны 3–4; в)  $\sqrt{5} \text{ Н}$  — направлена под углом

$\arctg\left(\frac{2}{3}\right)$  к диагонали 2–4. 27. а) 4,5 Н, направле-

на к точке А; б) 1,5 Н в сторону А; в) 2,5 Н в сторону Б; г)  $\approx 1 \text{ Н}$  под углом  $\approx 66^\circ$  к серединному перпендикуляру отрезка АВ.

28. 0,2 м вне отрезка АВ со стороны  $q_1$ ; от знака третьего заряда положение точки не зависит. 29.  $6,4 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$ . 30.  $1,1 \cdot 10^{-2} \text{ Н}$ ;

$2,9 \cdot 10^{-2} \text{ Н}$ . 31.  $4 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$ . 32.  $\frac{kq^2}{L^2}$ . 33.  $5,3 \cdot 10^9 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ;

$9,6 \cdot 10^9 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

### Контрольная работа (с. 337)

#### Уровень А

1. В. 2. Г. 3. В. 4. В. 5. Г. 6. 0,675 Н.

#### Уровень Б

1. Б. 2. Б. 3. В. 4. 0,3 Н. 5.  $0,66 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$ ;  $7,77 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$ .

**Обучающий тест (с. 343)**

1. Б. 2. В. 3. А. 4. Г. 5. А. 6. Г. 7. Г.

**Практикум по решению задач (с. 344)**

1.  $20\,000 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ . 2.  $5 \cdot 10^{-7}$  Кл. 3.  $4 \cdot 10^{-4}$  Н. 4. Пробный заряд не должен исказить картину распределения в пространстве зарядов, создающих поле, т. е. переместить их. Это можно обеспечить, выбирая пробный заряд достаточно малым. 5.  $1440 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ . 6. 0,38 Н; 0,63 Н; 0,13 Н. 7.  $3,6 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ ;  $1,8 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ . 8. 14 см. 9. См. рис. 9.

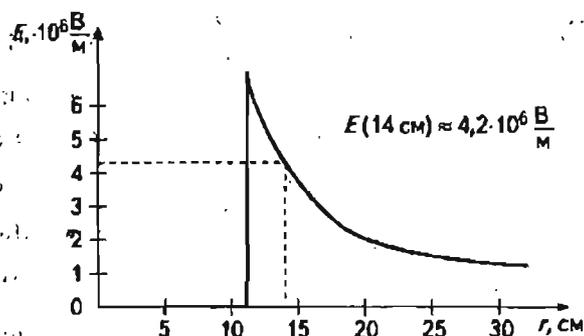


Рис. 9

10. См. рис. 10.

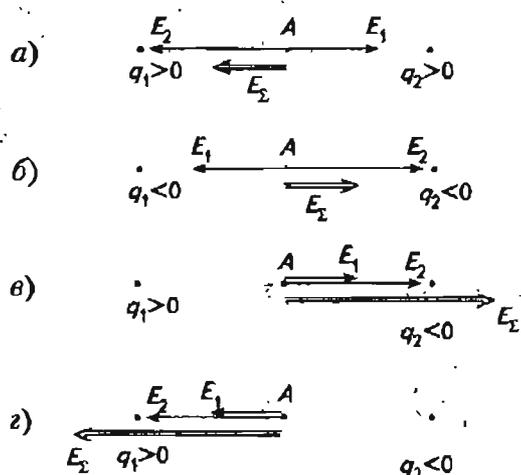


Рис. 10

12. а)  $475 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ ,  $\text{tg} \varphi = \frac{6}{23}$  при  $q_1 q_2 > 0$ ;  $184 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ ,  $\text{tg} \varphi = \frac{6}{5}$  при  $q_1 q_2 < 0$ ; где  $\varphi$  – угол между направлением  $E_x$  и стороной  $BC$ ; б)  $436 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ ,  $\text{tg} \varphi = \frac{50}{433}$  при  $q_1 q_2 > 0$ ;  $264 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ ,  $\text{tg} \varphi = \frac{250}{87}$  при  $q_1 q_2 < 0$ , где  $\varphi$  – угол между направлением  $E_x$  и стороной  $BC$ , где  $\varphi$  – угол между направлением  $E_x$  и высотой из вершины  $C$  на сторону  $AB$ . 13.  $336 \cdot 10^4 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ ;  $464 \cdot 10^4 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ ;  $144 \cdot 10^4 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ . 14.  $\vec{E}_x$  направлен от центра к стороне квадрата, соединяющей заряды  $+2 \cdot 10^{-8}$  Кл и  $-8 \cdot 10^{-8}$  Кл перпендикулярно ей;  $F \approx 2,5 \cdot 10^{-4}$  Н. 15.  $21,4 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ ;  $\text{tg} \varphi = 0,075$ ,  $\varphi$  – угол между вектором напряженности и стороной  $AB$  квадрата;  $60,6 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ ,  $\text{tg} \varphi = 0,026$ , где  $\varphi$  – угол между вектором напряженности и стороной  $CD$ . 16. а)  $13282 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ ,  $\text{tg} \varphi = 0,158$ , где  $\varphi$  – угол между вектором напряженности и стороной  $BC$  для одноименных зарядов (для разноименных –  $911 \frac{\text{В}}{\text{м}}$  и  $0,244$ ); б)  $952 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ ;  $\varphi = 139^\circ$ , где  $\varphi$  – угол между вектором напряженности и стороной  $AC$ .

**Контрольная работа (с. 347)**

Уровень А

1. В. 2. В. 3. Б. 4. Г. 5. В. 6.  $21600 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ , направлена в сторону отрицательного заряда.

Уровень Б

1. А. 2. Б. 3. А. 4. на 0,24 м левее положительного заряда. 5.  $10800 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ , направлена в сторону точки  $N$ .

**Обучающий тест (с. 353)**

1. Б. 2. А. 3. Б. 4. Б. 5. В. 6. Г.

**Практикум по решению задач (с. 354)**

1. 0,02 Дж. 2. -20 В. 3.  $-2,5 \cdot 10^{-5}$  Кл. 4. 50 В; -0,15 Дж; -50 В. 5.  $1 \cdot 10^{-4}$  Дж;  $-1 \cdot 10^{-4}$  Дж.

6.  $8 \cdot 10^{-6}$  Дж;  $-8 \cdot 10^{-6}$  Дж;  $+8 \cdot 10^{-6}$  Дж.  
 7.  $2 \cdot 10^{-16}$  Дж. 8.  $+1 \cdot 10^{-14}$  Дж;  $-1 \cdot 10^{-14}$  Дж;  
 $+1 \cdot 10^{-14}$  Дж. 9.  $2,7 \cdot 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . 10. На  $8,7 \cdot 10^5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .  
 11. В  $\approx 100\,000$  раз. 12. На 10 300 В.  
 13. На большем расстоянии; больше на  
 $\approx 10\,300$  В. 14.  $4 \cdot 10^{-5}$  Дж. 15. Увеличится на  
 $8,1 \cdot 10^{-4}$  Дж. 16.  $134 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . 17.  $1,4 \cdot 10^{-13}$  м.  
 18.  $2 \cdot 10^{-6}$  Дж;  $\varphi_1 - \varphi_2 = 20$  В; на увеличение кине-  
 тической энергии заряда. 19.  $2 \cdot 10^4 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ .  
 20.  $1,2 \cdot 10^{-5}$  Кл;  $25\,000 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ . 21.  $5,6 \cdot 10^4$  В.  
 22. 3,2 нг. 23. 21 000 В. 24. 2560 В; 3010 В;  
 увеличится. 25.  $1,05 \cdot 10^{-4}$  Дж.

**Контрольная работа (с. 358)**

Уровень А

1. Г. 2. А. 3. Г. 4.  $\Delta\varphi_{12} < 0$ ;  $|\Delta\varphi| = \left(\frac{m}{2e}\right)(v_2^2 - v_1^2)$ .  
 5. 80 В.

Уровень Б

1. Б. 2. Г. 3. 900 В. 4. 0,6 м от положительного за-  
 ряда. 5. 300 В. 6.  $4,3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

**Обучающий тест (с. 364)**

1. Б. 2. А. 3. Б. 4. Б. 5. В. 6. Г.

**Контрольная работа (с. 365)**

1. 24 Дж при условии, что работа сторонних сил не идет на нагрев самого источника при протекании через него тока. 2. В порах угольных электродов скапливаются газообразный хлор и водород, которые постепенно выходят на поверхность электродов и в раствор, где реагируют между собой. При этом энергия их химических связей преобразуется в энергию разделенных зарядов. 3. За счет механической — в электрофорной машине, динамомашине, пьезозажигалке; за счет энергии света — в солнечных батареях.

**Обучающий тест (с. 370)**

Уровень А

1. А. 2. Б. 3. Б. 4. Б. 5. А. 6. В.

Уровень Б

1. А. 2. Г. 3. Б. 4. А. 5. Б. 6. А.

**Практикум по решению задач (с. 372)**

1.  $5 \cdot 10^{-8}$  Н; от положительно заряженной пластины;  $1 \cdot 10^{-9}$  Дж; 2 В. 2. 25 В. 3.  $2 \cdot 10^{-6}$  Кл.  
 4. 1 мкФ. 5.  $\frac{Uq}{dm}$ . 6.  $40 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ ;  $10^{-6}$  Кл. 7. 5,7 В.  
 8. 4300 В. 9.  $2,25 \cdot 10^{-5}$  Дж. 10.  $1,8 \cdot 10^{-3}$  Дж.  
 11. 5000 В;  $1,25 \cdot 10^{-2}$  Дж. 12.  $C_1 C_2 = 10^{-6}$  Ф<sup>2</sup>.  
 13. а) энергия 1-го в  $\left(\frac{d_1}{d_2}\right)$  меньше; б) энергия  
 1-го в  $\left(\frac{d_1}{d_2}\right)$  больше. 14. Увеличится в 2 раза; энергия растет за счет работы силы, раздвигающей пластины, так как человек удаляет друг от друга заряды противоположного знака, совершая работу.  
 15.  $\frac{(\epsilon-1)CU^2}{2}$ . 16. уменьшится на 0,053 Дж, выделяется в виде тепла в соединительных проводах.  
 17. 12 мкКл; 24 мкКл; 36 мкКл; 6 мкФ.  
 18.  $q_1 = q_2 = q_3 = \frac{72}{11}$  мкКл;  $U_1 = \frac{72}{11}$  В;  
 $U_2 = \frac{36}{11}$  В;  $U_3 = \frac{24}{11}$  В. 19. 2С. 20.  $\frac{7C}{13}$ . 21.  $\frac{5C}{7}$ .  
 22.  $\frac{C(\epsilon+1)}{2}$ . 23.  $\frac{3\epsilon C}{1+2\epsilon}$ . 24.  $\frac{C(13\epsilon+2)}{3(4\epsilon+1)}$ .

**Контрольные работы (с. 379)**

Уровень А

1. Б. 2.  $6,25 \cdot 10^{-5}$  Ф. 3. 24 000  $\frac{\text{В}}{\text{м}}$ . 4. 0,2 Дж.

Уровень Б

1.  $K + qU$ . 2. 0,28 м<sup>2</sup>; 10 В. 3.  $5 \cdot 10^5$  Вт.

Уровень В

1.  $\frac{UeI^2}{2mbv^2}$ . 2.  $-2 \cdot 10^{-7}$  Дж. 3.  $q_1 = q_2 = \frac{2\epsilon C}{3}$ ;  $q_3 = 3\epsilon C$ ;  
 $U_1 = \frac{2\epsilon}{3}$ ;  $U_2 = \frac{\epsilon}{3}$ ;  $U_3 = \epsilon$ ;  $\Delta q = C\epsilon$ .

**Обучающий тест (с. 388)**

Уровень А

1. Г. 2. Б. 3. А. 4. Б. 5. Г. 6. Г. 7. Г.

Уровень Б

1. Г. 2. В. 3. В. 4. А. 5. А. 6. Б. 7. Б. 8. А.

**Практикум по решению задач (с. 390)**

1.  $5 \cdot 10^{-7}$  Кл;  $2,5 \cdot 10^{-6}$  А.

2. См. рис. 11.

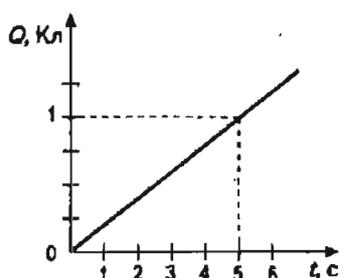


Рис. 11

3. 0,25 с. 4.  $8 \cdot 10^5$ . 5. 10 А. 6.  $2 \cdot 10^{-5} \frac{м}{с}$ ;  $\approx 20$  мг на катоде. 7.  $6,1 \cdot 10^{-6}$  м. 8.  $2 \cdot 10^{18} м^{-3}$ . 9.  $0,00125 \frac{м}{с}$ .

**Контрольная работа (с. 391)**

Уровень А

1. Раствор солей в воде. 2. Б. 3. Нет, ток равен 0,5 А. 4. Полупроводник: солнечная батарея и электронная схема калькулятора. Газ: неоновая лампа. Вакуум: дисплей компьютера.

Уровень Б

1. Электрон проводимости (металл, полупроводник) — электроны свободно перемещаются в среде под действием электрического поля, так как слабо связаны с конкретными атомами кристаллической решетки. Катион — положительно заряженный ион (раствор, расплав соли). Ионизация — образование иона при потере электрона атомом (газ). Дырочная проводимость — свойство полупроводников пропускать ток за счет перемещения вакан-

сий (дырок) по кристаллической решетке полупроводника. 2. Тепловое: измерять температуру калиброванного проводника. Химическое: измерять количество выпавшего при электролизе металла или выделившегося газа. На практике — по магнитному действию тока или с помощью свойств полупроводников. 3.  $0,04 \frac{мм}{с}$ .

Уровень В

1.  $8,4 \cdot 10^7 \frac{м}{с}$ . 2.  $\approx 106$  часов. 3.  $10^{23} м^{-3}$ .

**Обучающий тест (с. 397)**

Уровень А

1. Б. 2. В. 3. В. 4. А. 5. А. 6. Б.

Уровень Б

1. В. 2. Г. 3. Г. 4. А. 5. Г. 6. А.

**Практикум по решению задач (с. 398)**

1. 2,5 А. 2. 3 В. 3. 2 Ом. 4. В 1,25 раза; при повышении температуры нити сопротивление растёт. 5. Сопротивление упало от 5 до 4,4 Ом. Вследствие повышения температуры могла увеличиться подвижность ионов в растворе. 6. См. рис. 12.

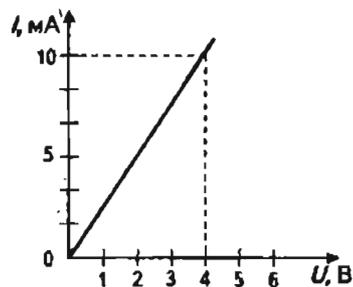


Рис. 12

7. 11 Ом. 8. 4 км. 9.  $12 \cdot 10^{-8}$  Ом · м, сталь. 10. 1 мм<sup>2</sup>. 11. 1 Ом. 12. 2,14 м. 13. 20 м,  $\approx 10^{-8} м^2$ . 14. На 240%, на 5%. 15.  $R_1 : R_2 : R_3 = 1 : 1 : 0,0004$ .

**Контрольная работа (с. 400)**

Уровень А

1. Увеличилось в 2 раза. 2. 2 Ом. 3. 2,8 В; 420 Кл; 1176 Дж.

Уровень Б.

1. 0,5 А; 8 с; 4 Дж. 2. 1,5 А.  
3.  $\Delta t^{\circ} = 500^{\circ}\text{C}$ , не расплавится.

**Самостоятельные работы (с. 403)**

1. 2А. 2.  $r \ll 2 \text{ Ом}$ . 3. 4В. 4. См. рис. 13.

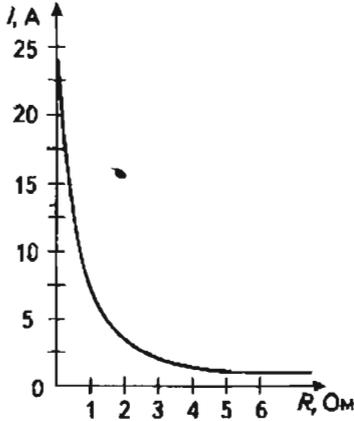


Рис. 13

5.  $I_{\text{кз}} = 30 \text{ А}$ , перегорит. 6. 100 А. 7. 0,75 А.  
8. 3,5 В; 1 Ом. 9. 6 В;  $\frac{2}{3} \text{ Ом}$ . 10.  $I_{\text{кз}} = 38 \text{ А}$ , перегорит. 11. См. рис. 14.

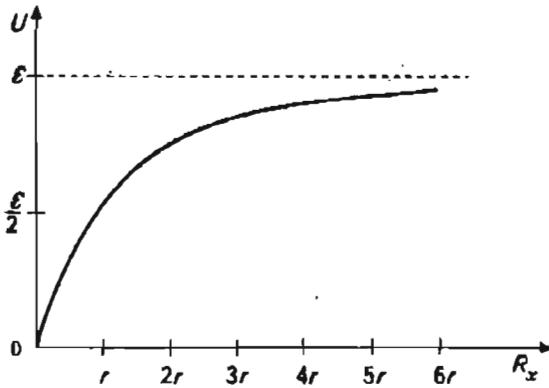


Рис. 14

**Контрольная работа (с. 405)**

Уровень А

1. 2 А. 3. 1 А.

Уровень Б

1. 2 Ом. 2.  $\approx 0,8 \text{ А}$ . 3. См. рис. 15.

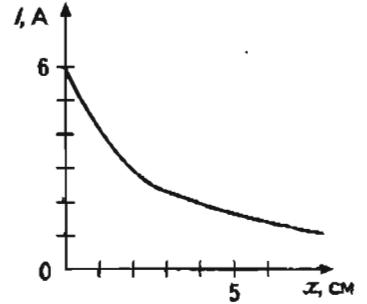


Рис. 15

**Обучающий тест (с. 410)**

Уровень А

1. В. 2. А. 3. Б. 4. Г. 5. В. 6. Б. 7. Г.

Уровень Б

1. В. 2. Б. 3. В. 4. В. 5. В. 6. Б. 7. В.

**Практикум по решению задач (с. 412)**

1. а) 3 Ом; б)  $\frac{4}{3} \text{ Ом}$ ; в) 6 Ом; г) 1 Ом; д)  $\frac{24}{7} \text{ Ом}$ ;  
е) 4,5 Ом. 2. 2 В; 4 В; 6 В. 3. 1,5 В; 1,5 А. 4. 4 А;  
8 В. 5. 0,5 А. 6. 2 А; 1 А. 7. а)  $\frac{12}{5} \text{ Ом} = 2,4 \text{ Ом}$ ;  
б)  $\frac{274}{99} \text{ Ом} \approx 2,8 \text{ Ом}$ ; в)  $\frac{27}{7} \text{ Ом} \approx 3,9 \text{ Ом}$ ;  
г)  $\frac{187}{63} \approx 3 \text{ Ом}$ ; д)  $\frac{87}{23} \text{ Ом} \approx 3,8 \text{ Ом}$ ; е) 5 Ом.

8. 3 А; 1,8 А; 1,2 А; 3,6 В. 9. а) 0,9 А; 0,8 А; 1,8 А;  
2,7 В; б) 1 А; 0,25 А; 1,5 В; в) 12 А; 6 А; 4 А; 36 В;  
24 В. 10. Сила тока через источник при параллельном соединении проводников в 4,5 раза выше, а через константановую проволоку в 3 раза выше.

11. а)  $\frac{5r}{7}$ ; б)  $\frac{4r}{5}$ ; в)  $\frac{r}{2}$ ; г)  $\frac{5r}{6}$ .

**Контрольная работа (с. 415)**

Уровень А

1. 9 Ом. 2.  $\frac{2}{3} \text{ А}$ . 3. 2,5 В. 4. 4,5 А. 5. 1 А; 4 В.

Уровень Б

1. 12 Ом. 2. 1 и  $\frac{1}{2}$ . 3. 1 А; 0,5 А; 0,25 А; 1,5 В.

4.  $\frac{5}{8}$  Ом. 5.  $\frac{2}{3}$  А;  $\frac{1}{3}$  А.

**Обучающий тест (с. 421)**

Уровни А и Б

1. В. 2. Б. 3. В. 4. А. 5. Б. 6. В.

**Практикум по решению задач (с. 421)**

1. а) 30 Дж; 20 Дж; 10 Дж; б) 30 Дж; 2,2 Дж; 4,4 Дж; в) 0,83 Дж; 0,56 Дж; 6,9 Дж; г) 7,5 Дж; 20 Дж; 2,5 Дж. 2. 2500 Вт. 3.  $\approx 15,6$  Ом. 4. 121 Ом. 5. 242 Ом; 484 Ом. 6. 2 Дж; 0,25 Дж. 7.  $\approx 4,4$  Ом. 8. 12 кДж; 48 кДж; 48 кДж. 9. 8 минут. 10.  $\frac{1}{6}$  кВт·ч. 11. 20 Вт. 12.  $\approx 0,032$  А. 13. 4 Ом.

14.  $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{1}{4}$ ;  $\frac{Q_1}{Q_2} = 4$ ;  $\frac{Q_1(a)}{Q_1(b)} = \frac{4}{25}$ . 15. 720 Дж. 16. 0,8 Ом; 5 А; 4 В или 0,2 Ом; 10 А; 2 В. 17. 28,8 Дж.

**Контрольная работа (с. 424)**

Уровень А

1. 440 Вт. 2. 0,8 Вт; 480 Дж. 3. 2,5 Дж. 4. 16% или 9600 Дж.

Уровень Б

1. Все. 2. 484 Вт; 242 Вт; 968 Вт. 3. 4 Вт.

**Обучающий тест (с. 433)**

1. В. 2. В. 3. Б. 4. Г. 5. А. 6. Б. 7. Б. 8. Б. 9. А. 10. Г. 11. В. 12. А.

**Контрольная работа (с. 435)**

Уровень А

1. См. рис. 16. 2. 1. 3. См. рис. 17; при увеличении силы тока и возрастании числа витков на единицу длины катушки линии будут сгущаться пропорционально росту этих величин; при введении в нее железного сердечника густота линий возрастет многократно (более чем в 10 раз).

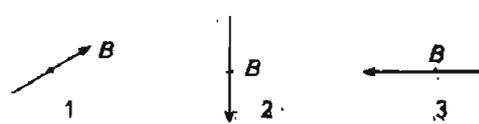


Рис. 16

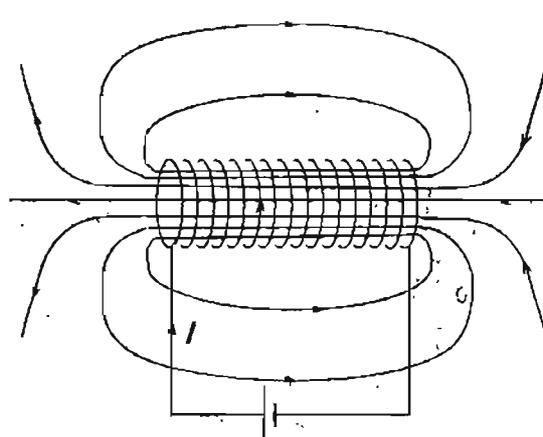


Рис. 17

Уровень Б

1. Картина силовых линий будет сходна с картиной целого полосового магнита. 2. Вектор должен идти по касательной и быть длиннее там, где линии гуще. 3. Не менее 0,18 Тл. 4. а) отклонится от вертикали в противоположную сторону примерно на такой же угол; б) чуть увеличится в случае алюминиевого сердечника; чуть уменьшится в случае сосуда с водой; существенно возрастет в случае стального сердечника.

**Обучающий тест (с. 443)**

Уровень А

1. Г. 2. Б. 3. А. 4. Г. 5. Б. 6. Б.

Уровень Б

1. А. 2. Б. 3. Г. 4. Г. 5. Б.

**Практикум по решению задач (с. 445)**

1.  $2 \cdot 10^{-7}$  Тл. 2. Сила, действующая на верхнюю и нижнюю перемычку равна 0; на правую действует из плоскости листа; на левую — в плоскость листа.

3. а)  $F=0$ ; б)  $\uparrow$ ; в)  $\downarrow$ ; г)  $\oplus$ . 4.  $30^\circ$ . 5.  $q > 0, \downarrow$ ;  $q=0, F=0$ ;  $q < 0, \uparrow$ . 6.  $1,6 \cdot 10^{-15}$  Н; вектор скорости меняет направление, не меняя модуля. Траектория — прямая, окружность, дуга окружности (см. рис. 18). 7. 0,01 Тл. 8.  $\approx 8,7$  г. 10.  $\frac{R_1 - q_2 \sqrt{M_1}}{R_2 - q_1 \sqrt{M_2}}$ . 11.  $3,6 \cdot 10^{-11}$  с, не зависит от скорости. 12.  $81^\circ$ .

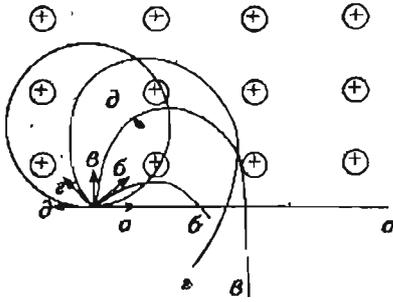


Рис. 18

**Контрольная работа (с. 447)**

Уровень А

1.  $\frac{F_A}{F_n} = 6,25$ . 2. См. рис. 19. 3. См. рис. 20.

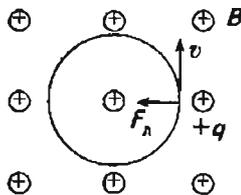


Рис. 19

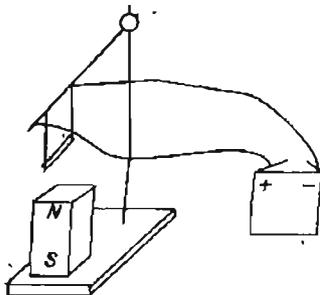


Рис. 20

Уровень Б

1. Для определения единицы силы тока — 1 ампер; для определения единицы модуля вектора магнитной индукции — 1 тесла. 2.  $2,28 \cdot 10^{-3}$  Тл. 3.  $F_{\text{гор}} = 4 \cdot 10^{-3}$  Н;  $F_{\text{верт}} = 3,5 \cdot 10^{-3}$  Н.

**Обучающий тест (с. 456)**

1. А. 2. В. 3. В. 4. Г. 5. А. 6. В. 7. А. 8. В. 9. Б. 10. А. 11. Б. 12. Б. 13. Б. 14. Г.

**Практикум по решению задач (с. 458)**

1. 25%. 2.  $\frac{10}{19} = 53\%$ ; 100 с; 190 кДж = 0,053 кВт · ч. 3. 60 А. 4. 30 Ом; 7,3 А. 5. График — см. рис. 21; КПД 10%.

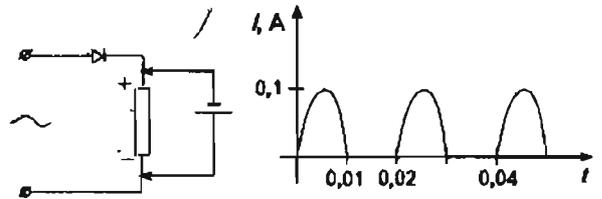


Рис. 21

**Контрольная работа (с. 000)**

Уровень А

1. 45 кВт · ч. 2.  $\approx 2,3$  А; 0,25 кВт · ч.

Уровень Б

1. 44 А. 2. 56%. 3. КПД =  $4 \cdot 10^{-6} = 4 \cdot 10^{-4}\%$ .

Потенциальная энергия груза перешла в кинетическую энергию, а затем в теплоту при торможении груза и деформации шнура. Кроме того теплота выделилась в обмотке генератора, в подводящих проводах и в полупроводниковом диоде.

## Электромагнитные колебания и волны. Оптика

### Самостоятельная работа (с. 467)

#### Вариант 1

1. Электромагнитные колебания отличаются амплитудой колебаний силы тока и напряжения.

2. Емкость конденсатора определяется по маркировке, период вычисляется по формуле  $T = 2\pi\sqrt{LC}$ .

#### Вариант 2

1. Если конденсаторы были заряжены от одного источника тока, то электромагнитные колебания отличаются только временем затухания: при большем сопротивлении уменьшение амплитуды за период — большее.

2.  $T = 2,4 \cdot 10^{-7}$  с.

### Практикум по решению задач (с. 467)

1. Для данного момента времени закон сохранения энергии имеет вид  $\frac{Cu^2}{2} + \frac{Li^2}{2} = \frac{LI_0^2}{2}$ . Отсюда получа-

$$\text{ем: } i = \sqrt{\frac{LI_0^2 - Cu^2}{L}}$$

2. Емкость плоского конденсатора вычисляется по

формуле  $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$ , т.е. при увеличении  $d$  емкость уменьшается. Индуктивность соленоида вычисляется по формуле  $L = \mu\mu_0 S n^2 l$ , где  $S$  — площадь сечения витка;  $n$  — число витков на единицу длины  $l$ . При увеличении расстояния между витками уменьшается значение  $n$ , т.е. уменьшается индуктивность  $L$ . Следовательно, исходя из формулы Томсона период электромагнитных колебаний уменьшается.

### Контрольная работа (с. 480)

#### Вариант 1

1.  $1,2 \cdot 10^4$  Гц. 2. Напряжение 2200 В, сила тока 0,02 А.

#### Вариант 2

1. Индуктивность определяется с использованием формулы Томсона, в итоге получаем  $5 \cdot 10^{-6}$  Гн.

2. Во вторичной обмотке 2520 витков, провод в ней тоньше.

### Итоговый тест (с. 481)

1. В. 2. Г. 3. Г. 4. Б. 5. Б. 6. Б. 7. Д. 8. Д. 9. В. 10. Г. 11. В. 12. Г. 13. В. 14. В. 15. Б. 16. Б. 17. Д. 18. Г. 19. Д. 20. Г.

### Контрольная работа (с. 491)

#### Вариант 1

1. В вакууме — со скоростью света.

2. В природе существуют переменные электрические и магнитные поля. Векторы  $E$  и  $B$  — лишь их характеристики.

3. По аналогии с механическими волнами при условии, когда вектор скорости  $V$  перпендикулярен векторам  $E$  и  $B$ , электромагнитную волну называют поперечной.

#### Вариант 2

1. Электромагнитная волна — вид материи; электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве с течением времени — процесс распространения электромагнитного поля.

2. Провести опыты: изменится ли прием, если отключить прибор «Разряд-1».

3. Электромагнитные волны излучают лишь ускоренно движущиеся заряды.

4. Согласно «правилу буравчика», вектор  $E$  направлен по оси  $OZ$ .

## Вариант 3

1. Можно, если изменить расстояние между излучателем и приемником электромагнитных волн.

2. При трансформации колебательного контура расстояние между пластинами конденсатора увеличивается, а площадь пластин уменьшается.

Отсюда, согласно формуле  $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$  емкость конденсатора уменьшается. Площадь сечения витка, число витков, в целом длина — уменьшились, тогда согласно формуле для индуктивности катушки индуктивность уменьшилась. Общий вывод: период колебаний уменьшился, частота возросла.

3. Модель — всего лишь средство описания изучаемого объекта; она описывает лишь часть свойств объекта; электромагнитная волна — объект природы, ее модель теоретически создана человеком.

4. Электромагнитная волна может распространяться в вакууме, потому что это процесс взаимосвязанного изменения электрического и магнитного полей, в результате которого и происходит распространение электромагнитных колебаний в пространстве с течением времени.

## Самостоятельная работа (с. 499)

2.  $p_1 = F_m t = e B_m v \sin \omega t \cdot t$  — импульс электромагнитной волны, переданный электрону. С учетом того, что  $B_m = \frac{E_m}{c}$  и  $F_m = e E_m \sin \omega t$ , получаем:  $p_1 = \frac{W_1}{c}$ . Полный импульс равен сумме импульсов, которые электромагнитная волна передает электронам вещества.

5. На расстоянии между рупором излучателя и экраном укладываются 5,5 длин волн стоячей волны, т. е. согласно данным рисунка можно определить длину волны  $\lambda = 1,4$  см, а длина бегущей волны в два раза больше. По формуле  $v = \lambda \nu$  получаем значение скорости:  $2,8 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$ .

## Самостоятельная работа (с. 506)

2. Сигнал модулирован временем излучения: по виду это телеграфный сигнал: точки, тире. При радиолокации сигнал проходит в два раза большее расстояние.

3. Сигнал SOS имеет частоту  $5 \cdot 10^5$  Гц. Радиоволна такой большой длины хорошо распространяется именно недалеко от места бедствия, в частности, хорошо огибает препятствия.

## Контрольная работа (с. 506)

## Вариант 1

1. Преобразование высокочастотного излучения с помощью низкочастотного происходит в передатчике.

2. Цель находится на расстоянии  $2 \cdot 10^5$  м.

## Вариант 2

1. Минимальное расстояние, на котором локатор может обнаружить цель, связано с разрешением сигнала. Для этого, по-видимому, между излучением и приемом импульса должна быть пауза: продолжительностью не меньше времени импульса. Отсюда минимальное расстояние равно 150 м. Максимальное время равно периоду колебаний, т. е.  $7 \cdot 10^{-4}$  с. Отсюда максимальное расстояние равно  $\approx 10^5$  м. Однако заметим, что возможен прием отраженного сигнала и в рамках последующих пауз.

3. Для лучшего приема электромагнитной волны приемная антенна должна быть расположена параллельно вектору  $E$ .

## Вариант 3

1. Энергия импульса 0,2 Дж; средняя мощность станции 200 Вт; число длин волн в одном импульсе  $3 \cdot 10^4$ . 2. По формуле Томсона период равен  $6 \cdot 10^{-8}$  с, тогда длина волны 18 м, а длина полуволнового вибратора 9 м.

3. От частоты повторения импульсов, времени их излучения, частоты электромагнитной волны, области видимости, затухания сигнала (свойств среды).

4. Плотность потока излучения обратно пропорциональна квадрату расстояния, т. е. она уменьшается в  $10^4$  раза, возвращенный сигнал уменьшается еще в  $10^4$  раз. Значит, надо усиливать сигнал в  $10^8$  раз.

**Самостоятельная работа (с. 533).**

1. Приложено напряжение около 500 В.
2. По формуле для максимумов можно определить углы, под которыми распространяются волны:  $d \sin \varphi_1 = \lambda_1$  и  $d \sin \varphi_2 = \lambda_2$ . Зная угол и расстояние от дифракционной решетки до экрана, можно определить положение двух волн крайней частоты на экране:  $l_1 = a \cdot \operatorname{tg} \varphi_1$  и  $l_2 = a \cdot \operatorname{tg} \varphi_2$ . Их разность дает ширину спектра первого порядка. При малых углах  $\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi \approx \varphi$ . При этих условиях расчет дает значение ширины спектра около 10 см.

**Итоговый тест (с. 533)**

1. Г. 2. Д. 3. В. 4. Г. 5. Д. 6. Д. 7. Г. 8. Д. 9. Г. 10. Д. 11. А. 12. В. 13. А. 14. А. 15. Б. 16. А. 17. Д. 18. Д. 19. В. 20. Д.

**Самостоятельная работа (с. 542)**

1. Да, является. Выбором ИСО, т. е. средством описания, изучения явлений, нельзя «уничтожить» событие.
2. Все эксперименты по измерению скорости света.
3. В двух ИСО  $K$  и  $K'$  имеем выражения для интервала:  $S_1^2 = c^2 \Delta t_1^2 - \Delta x_1^2$  и  $S_2^2 = c^2 \Delta t_2^2 - \Delta x_2^2$ . Надо доказать равенство этих выражений. Для этого следует воспользоваться формулами преобразования интервалов координат и времени из одной ИСО в другую, т. е. воспользоваться преобразованиями Лоренца.

4. Надо по формуле сложения скоростей определить скорости света для двух разных ИСО, т. е.:

$$V = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = c$$

Скорость сближения частиц в их собственных ИСО различна.

5. Внутренняя энергия — это энергия относительного движения и взаимодействия частиц вещества. Она не зависит от выбора ИСО, т. е. является инвариантом. Масса тела — не инвариант. Она зависит от выбора ИСО:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Электрический заряд — инвариант; это следует из многочисленных фактов, полученных опытным путем.

**Геометрическая оптика**

**Самостоятельная работа (с. 559)**

1.  $\gamma_1 = 18^\circ 40'$ ; при угле падения  $45^\circ$  будет иметь место полное отражение света.
2. — 0,1 м.
3.  $d = 21$  см;  $D = 5$  дптр.
4.  $d = 55$  см;  $f = 5,5$  см.
5.  $L = F_1$ .
6.  $f_2 = 0,4$  м.
7.  $f = 15$  см;  $H = 1,25$  см.
8. Близорукость;  $D = 2,25$  дптр.
9.  $D \approx -2,7$  дптр.

**Самостоятельная работа (с. 560)**

1.  $d = \frac{2h}{\sqrt{n^2 - 1}}$ .
2.  $F = \frac{R}{2n}$ .
3. 65 см.
4.  $\omega_1 \approx 2,2 \text{ с}^{-1}$ ;
- $\omega_2 \approx 3,3 \text{ с}^{-1}$ .
5.  $n \approx 1,4$ .
6.  $t = 0,04$  с.

**Контрольная работа (с. 561)**

Вариант 1

1. Г. 2. Б. 3. Б. 4. Г. 5. Б. 6. Г. 7. Б. 8. Г. 9. А. 10. Б.

Вариант 2

1. Г. 2. Б. 3. Г. 4. А. 5. Г. 6. Б. 7. В. 8. А. 9. Б. 10. А.

**Контрольная работа (с. 564)**

Вариант 1.

2.  $\approx 21^\circ$ .

Вариант 2.

1.  $\approx 2$  м.

**Контрольная работа (с. 564)**

3.  $f \approx 0,06$  м;  $|d| = 0,17$  м;  $|f| < |d|$

## Физика атома и атомного ядра

**Контрольная работа (с. 577)**

1. А. 2. Г. 3. А. 4. Б. 5. Д. 6. В. 7. Б. 8. Г. 9. В. 10. Д.

**Самостоятельная работа (с. 578)**

1.  $E_k = 1$  эВ;  $A = 2$  эВ;  $h\nu_1 = 3$  эВ.

2. См. рис. 22.

3. При  $\lambda_1 = 250$  нм  $E_{k1} = 4,8 \cdot 10^{-19}$  Дж; при  $\lambda_2 = 1000$  нм фотоэффект невозможен, так как  $\lambda_2 < \lambda_{кр}$ .

4.  $h\nu_1 = A$ ;  $h\nu_2 = A + \Delta A$ ,  $\Delta A = e\phi = k \frac{eq}{R}$ .

$h(\nu_2 - \nu_1) = \Delta A$ ,  $\Delta\nu = \frac{\Delta A}{h} = \frac{k \cdot e \cdot q}{h \cdot R}$ .

5.  $6,88 \cdot 10^3$  Вт·м<sup>-2</sup>.

**Контрольная работа (с. 591)**

1. Д. 2. А. 3. В. 4. Б. 5. В. 6. Г. 7. Б. 8. Б. 9. Г. 10. А.

**Самостоятельная работа (с. 592)**

1.  $1,5 \cdot 10^8$ .

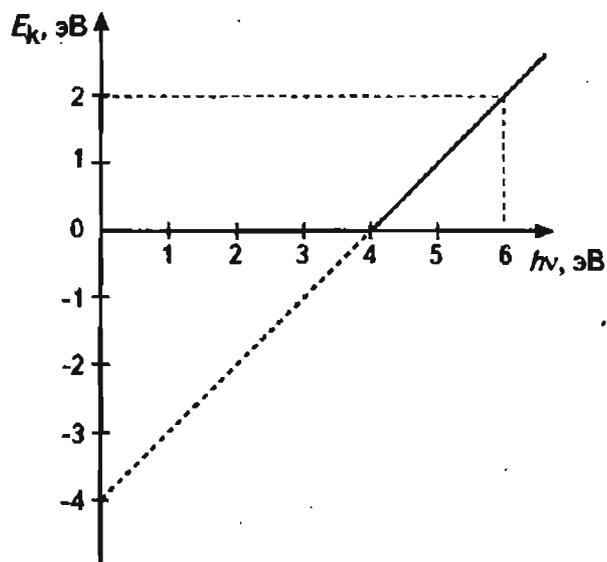


Рис. 22

$$2. A = \lambda \cdot N, \lambda = \frac{\ln 2}{T}, \lambda \approx \frac{0,693}{3,82 \cdot 24 \cdot 3600} \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$$

$$N_0 = n \cdot V, N_0 = 2 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \cdot 50 \text{ м}^3 = 10^{10}$$

$$A_0 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1} \cdot 10^{10} = 2 \cdot 10^4 \text{ Бк}$$

$$N_1 = \frac{N_0}{4}, N_1 = 2,5 \cdot 10^9$$

$$A_1 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1} \cdot 2,5 \cdot 10^9 = 5 \cdot 10^3 \text{ Бк}$$

$$3. T = \frac{\ln 2}{\lambda}, \lambda \approx \frac{A}{N}, N = \nu \cdot N_A, N = \frac{6 \cdot 10^{23}}{238} \approx 2,52 \cdot 10^{21}$$

$$\lambda = \frac{1,24 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}}{2,52 \cdot 10^{21}} = 4,92 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$$

$$T = \frac{0,693}{4,92 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}} = 1,41 \cdot 10^{17} \text{ с} = 4,5 \cdot 10^9 \text{ лет.}$$

4. Пример возможной кривой распада для этого случая представлен на рис. 23 (см. с. 588).

**Контрольная работа (с. 614)**

1. В. 2. А. 3. Б. 4. В. 5. Б. 6. Д. 7. Г. 8. А. 9. В. 10. Г.

**Самостоятельная работа (с. 616)**

3.  $\nu = 2,47 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ ;  $\lambda = 1,21 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ ;

$$E = 1,64 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = 10,2 \text{ эВ.}$$

4. Электрон совершает  $-6,6 \cdot 10^7$  оборотов, время жизни атома в возбужденном состоянии  $\sim 66$  миллионов «атомных лет».

5. Из правила квантования орбит по моменту импульса  $mv_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$  импульс электрона  $P_n$  связан с радиусом  $r_n$  стационарной орбиты:

$$P_n = mv_n = n \frac{h}{2\pi r_n}$$

Так как  $\lambda = \frac{h}{P}$ , получаем для  $\lambda_n$ :

$$\lambda_n = \frac{h \cdot 2\pi r_n}{nh} = \frac{2\pi r_n}{n}$$

Для  $n = 1$ :  $\lambda_1 = 2\pi r_1$ ;

для  $n = 2$ :  $\lambda_2 = \frac{2\pi r_2}{2} = \pi r_2$ .

На первой бортовой орбите укладывается одна длина дебройлевской волны электрона, на второй — две дебройлевских волны. Стационарные состояния в атоме водорода по Бору соответствуют условию образования стоячих дебройлевских волн.

6. Отличается главным квантовым числом  $n$  (или энергией). Проекция спина  $S_z$  могут быть одинаковыми или различными.

7. Одинаковы значения орбитального квантового числа  $l$  (орбитального момента  $L$ ), различны значения проекции  $L_z$  орбитального момента. Значения проекции спина  $S_z$  могут быть одинаковыми или различными.

9.  $r_{10000} = n^2 r_1$ ,  $r_{10000} = (10^4)^2 \cdot 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ м} \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 5 \text{ мм}$ .

Диаметр десяти тысячной бортовой орбиты оказывается равным примерно одному сантиметру. Никаких принципиальных запретов для существования таких больших атомов нет. Найти или создать такие атомы очень трудно, так как энергия их ионизации во много раз меньше кинетической

энергии теплового движения атомов при комнатной температуре, однако в специальных опытах уже наблюдались атомы со значениями  $n = 1000$ . Примерно в таких же состояниях обнаружены атомы в межзвездном пространстве.

10. О происхождении спектров во многих учебниках сообщается, что при высокой температуре вещества в твердом и жидком состояниях наблюдается сплошной спектр излучения, в газообразном состоянии — линейчатый. При прохождении света со сплошным спектром излучения через холодные газы наблюдаются линейчатые спектры поглощения. Эти утверждения верны, но они не дают полного ответа на вопрос о возможных способах возбуждения спектров различного вида. Пример излучения солнечной фотосферы и, следовательно, большинства звезд во Вселенной показывает, что вещество и в плазменном состоянии, близком к газообразному, может давать сплошной спектр излучения.

Возможны различные механизмы возникновения излучения со сплошным спектром в разреженном горячем газе. Первый из них — рекомбинация свободных электронов с положительными ионами. Энергия свободного электрона не квантована, поэтому возникающий при этом спектр имеет ограничение только со стороны низких частот. Этим механизмом порождается часть сплошного спектра солнечного излучения в ультрафиолетовом диапазоне. Сплошной спектр излучения со стороны низких частот ограничивается максимальным значением частоты линий серии Лаймана.

Второй механизм возникновения излучения со сплошным спектром — тормозное излучение свободных электронов, движущихся в электрических полях, создаваемых положительными ионами плазмы. Так как спектр скоростей свободных электронов в плазме сплошной и они проходят на различных случайных расстояниях от положительных ионов, спектр их тормозного излучения также сплошной.

Третий механизм возникновения сплошного спектра — излучение при образовании отрицательных ионов. Свободный электрон может обладать любой кинетической энергией до присоединения к нейтральному атому. Поэтому хотя энергетические состояния отрицательного иона квантованы, при соединениях электронов с нейтральными атомами возникает излучение со сплошным спектром.

В фотосфере Солнца происходят все три указанных процесса, однако основным источником излучения со сплошным спектром в области видимого света являются процессы образования отрицательных ионов водорода.

Темные линии поглощения в спектре фотосферы возникают по той причине, что часть фотонов поглощается атомами газов хромосферы.

Этот пример показывает, что и при прохождении света со сплошным спектром через газ при высокой температуре возникает линейчатый спектр поглощения. Линейчатый спектр излучения хромосферы, наблюдаемый при затмениях, объясняется тем, что после поглощения фотонов света возбужденные атомы газов хромосферы быстро возвращаются в нормальное состояние и испускают точно такие же фотоны света, какие были поглощены. Это излучение хромосферы существует постоянно, но оно незаметно на фоне интенсивного излучения фотосферы. Когда же свет от фотосферы закрыт диском Луны, спектр излучения хромосферы становится легко наблюдаемым.

#### Контрольная работа (с. 629)

1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5. А. 6. Г. 7. А. 8. В. 9. Д. 10. Б.

#### Контрольная работа (с. 630)

1. Д. 2. А. 3. Д. 4. А. 5. В. 6. Д. 7. Г. 8. Б. 9. Г. 10. Б.

#### Самостоятельная работа (с. 631)

1.  $E_{св} \approx 28,3 \text{ МэВ}$ ,  $\frac{E_{св}}{A} \approx 7,1 \frac{\text{МэВ}}{\text{нукл}}$

2.  $E_{св} \approx 32,0 \text{ МэВ}$ ,  $\frac{E_{св}}{A} \approx 5,3 \frac{\text{МэВ}}{\text{нукл}}$

3. Возможно,  $\Delta E = 0,157 \text{ МэВ}$ .

4. Невозможно. 5. Невозможно. 6. Возможно,  $\Delta E = 0,48 \text{ МэВ}$ .

7. Возможно,  $\Delta E = 0,131 \text{ МэВ}$ .

8. Невозможно. 9. Возможно,  $\Delta E = 5,40 \text{ МэВ}$ .

10. Возможно,  $\Delta E = 4,28 \text{ МэВ}$ .

#### Контрольная работа (с. 645).

1. Г. 2. В. 3. Д. 4. В. 5. Б. 6. В. 7. А. 8. А. 9. Г. 10. А.

#### Самостоятельная работа (с. 646).

1. 0,42 МэВ. 2. 5,5 МэВ. 3. 17,6 МэВ. 4. 12,9 МэВ.

5. 0,63 МэВ. 6. 4,03 МэВ. 7. -2,64 МэВ.

8. При решении задачи 4 получен выход реакции 12,9 МэВ. Умножив выход реакции на число ядер в 1 кг гелия, получим искомое количество энергии  $E$ , освобождаемой при синтезе:

$$E = 12,9 \cdot 10^6 \text{ эВ} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{Дж}}{\text{эВ}} \cdot \frac{6 \cdot 10^{26}}{4} \approx 3,1 \cdot 10^{14} \text{ Дж.}$$

Разделив энергию  $E$  на теплотворную способность  $q$  угля, получим искомую массу  $m$  угля:

$$m = \frac{E}{q}, \quad m = \frac{3,1 \cdot 10^{14} \text{ Дж}}{3 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} \approx 10^7 \text{ кг} = 10000 \text{ тонн.}$$

9. Кинетическая энергия осколков  $E_k$  равна потенциальной энергии  $E_n$  электрического заряда одного осколка ядра в электрическом поле заряда второго осколка:

$$E_k = E_n = q_1 \Phi_2 = q_1 \cdot k \frac{q_2}{r} = k \frac{q_1 q_2}{r} = k \frac{46 \cdot e \cdot 46 \cdot e}{r}$$

Расстояние  $r$  по условию задачи равно:

$$r = 2R = 2 \cdot 1,3 \cdot 10^{-15} \sqrt[3]{238} \text{ м} \approx 16 \cdot 10^{-15} \text{ м.}$$

Подставляя значения элементарного заряда  $e$ , расстояния  $r$  и коэффициента  $k$ , получим значение энергии:

$$E_{\kappa} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{46 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 46 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-14}} \text{ Дж} \approx$$

$$\approx 3,05 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} \approx \frac{3,05 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}}{1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{Дж}}{\text{эВ}}} \approx 1,9 \cdot 10^8 \text{ эВ} =$$

$$= 190 \text{ МэВ.}$$

10. Найдем энергию, выделяющуюся за сутки:

$$E = 3 \cdot 10^9 \text{ Вт} \cdot 24 \cdot 3600 \text{ с} \approx 2,6 \cdot 10^{14} \text{ Дж.}$$

Энергия  $E_1$ , выделяющаяся при делении одного ядра урана в джоулях равна:

$$E_1 = 200 \cdot 10^6 \text{ эВ} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{Дж}}{\text{эВ}} = 3,2 \cdot 10^{-13} \text{ Дж.}$$

Число  $N$  ядер, испытавших деление за 1 сутки, равно:

$$N = \frac{E}{E_1} = \frac{2,6 \cdot 10^{14} \text{ Дж}}{3,2 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}} = 8,1 \cdot 10^{24}.$$

Вычислим массу  $N$  ядер урана:

$$m = m_{\text{я}} \cdot N, m = \frac{235 \cdot 8,1 \cdot 10^{24}}{6 \cdot 10^{26}} \text{ кг} \approx 3,2 \text{ кг.}$$

За сутки работы мощного ядерного реактора в нем образуется примерно в 3 раза больше радиоактивных изотопов, чем при взрыве атомной бомбы в 20 кт ТНТ.

**Контрольная работа (с. 658)**

1. В. 2. А. 3. Б. 4. В. 5. Г. 6. Б. 7. Г. 8. Г. 9. В. 10. А.

**ЗАО «Компания «АСТ-ПРЕСС»:**  
Россия, 107078, Москва, Рязанский пер., д. 3  
(ст. м. «Комсомольская», «Красные ворота»)  
Тел./факс 261-31-60, тел.: 265-86-30, 974-12-76  
E-mail: [astpress@cityline.ru](mailto:astpress@cityline.ru)  
<http://www.ast-press-edu.ru>

По вопросам покупки книг «АСТ-ПРЕСС» обращайтесь

■ Москва: «АСТ-ПРЕСС Образование»	Офис: Москва, Рязанский пер., д. 3 Тел./факс: (095) 265-84-97, 265-83-29
Склад	E-mail: <a href="mailto:ast-pr-e@postman.ru">ast-pr-e@postman.ru</a> г. Балашиха, ш. Энтузиастов, д. 4 Тел.: (095) 521-78-37, 521-03-72
■ Москва: «КЛУБ 36'6» —	Офис: Москва, Рязанский пер., д. 3 Тел./факс: (095) 261-24-90, 267-28-33
Склад:	г. Балашиха, Звездный бульвар, д. 11 Тел.: (095) 523-92-63, 523-11-10
Магазин (розница и малкий опт):	Москва, Рязанский пер., д. 3 Тел. (095) 265-86-56
Переписка и книги — почтой:	107078, Москва, а/я 245, «КЛУБ 36'6»
■ Санкт-Петербурге и Северо-Западном регионе: «Невская юнга»	Тел.: (812) 567-47-55, 567-53-30
■ Киев: «АСТ-ПРЕСС-Дикси»	Тел.: (044) 229-23-33, 228-43-59

*Универсальное учебное пособие*

## ФИЗИКА

*школьный курс*

Учебное издание

Ответственный редактор *И. Михайлова*

Редактор разделов «Механика», «Электростатика и постоянный ток» *Л. Величко*

Научное и техническое редактирование, компьютерная верстка выполнены  
«Инфоркомпресс» по заказу «АСТ-ПРЕСС»

ЛР № 064267 от 24.10.95.

Подписано в печать 17.11.99. Формат 84 × 108<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага типографская.

Печать офсетная. Печ. л. 43,0.

Тираж 25 000 экз. Заказ № 323. С-003.

Налоговая льгота — общероссийский классификатор продукции  
ОК-005-93, том 2 — 953 000.

Гигиенический сертификат № 77.99.6.953.П.3138.6.99. от 04.06.1999 г.

«АСТ-ПРЕСС», 107078, Москва, а/я, 5.

Отпечатано с готовых диапозитивов в полиграфической фирме  
«КРАСНЫЙ ПРОЛЕТАРИЙ», 103473, Москва, Краснопролетарская, 16

УНИВЕРСАЛЬНОЕ УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

# ФИЗИКА

краткое изложение всех разделов  
школьной программы по всем предметам

самостоятельные  
и проверочные работы

обучающие и справочные таблицы

творческие задания

лабораторные и практические работы

В серии:

Русский язык

Литература

Математика

Физика

Химия

Биология

История

География

ISBN 5-7805-0538-1  
9 785780 505389 >