

Э П Е К Т И В Н Ы Й К У Р С

В. А. Орлов С. В. Дорожкин

ПЛАЗМА – ЧЕТВЕРТОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА

Методическое пособие



БИНОМ

Э Л Е К Т И В Н Ы Й К У Р С

В. А. Орлов С. В. Дорожкин

ПЛАЗМА – ЧЕТВЕРТОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА

Методическое пособие

Издание подготовлено при содействии
НФПК – Национального фонда подготовки кадров



Москва
БИНОМ. Лаборатория знаний
2005

УДК 075.3
ББК 22.3я721
066

Орлов В. А.

066 Плазма — четвертое состояние вещества. Элективный курс: Методическое пособие / В. А. Орлов, С. В. Дорожкин — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. — 143 с.: ил.

ISBN 5-94774-149-0

Методическое пособие состоит из программы курса, методов проведения занятий, методики изложения всех представленных тем и проведения лабораторного практикума.

Для преподавателей старших классов физико-математического и естественно-научного профилей.

УДК 075.3

ББК 22.3я721

По вопросам приобретения обращаться:

«БИНОМ. Лаборатория знаний» (095) 955-03-98, e-mail: lbz@aha.ru

ISBN 5-94774-149-0

© Орлов В. А., Дорожкин С. В., 2005
© БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005

Содержание

Программа элективного курса «Плазма — четвертое состояние вещества»	4
Методы проведения занятий	10
1. Методика изложения темы «Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях»	15
2. Методика изложения темы «Плазма. Основные характеристики плазмы»	40
3. Методика изложения темы «Методы описания плазмы»	56
4. Методика изложения темы «Процессы в плазме»	65
5. Методика изложения темы «Плазма в природе»	79
6. Методика изложения темы «Плазма в технике»	91
7. Лабораторный практикум к элективному курсу «Плазма — четвертое состояние вещества»	121
8. Методика проведения физико-технической конференции и экскурсий по теме «Плазма на Земле и в космосе»	139
Приложение. Задания с выбором ответа.	142

Программа элективного курса «Плазма – четвертое состояние вещества»

Пояснительная записка

Изучение элективного курса «Плазма — четвертое состояние вещества» направлено на достижение следующих целей:

- развитие представлений школьников о физической картине мира на основе знакомства с четвертым состоянием вещества;
- расширение, углубление и обобщение знаний о строении вещества;
- реализация внутрипредметных и межпредметных связей, так как при изучении плазменного состояния вещества актуализируются не только знания из разных разделов физики, но и из других наук, прежде всего химии и астрономии;
- развитие познавательных интересов, интеллектуальных и творческих способностей на основе ознакомления учащихся с современными достижениями науки и техники, связанными с изучением и применением плазмы;
- формирование практических умений на основе решения физических задач и самостоятельного приобретения новых знаний, выполнения экспериментальных исследований, подготовки докладов, рефератов и других творческих работ.

Формирование системы знаний о веществе нельзя считать полноценным без изучения его четвертого агрегатного состояния — плазмы. С плазмой приходится встречаться практически всюду. Человек познакомился с плазмой на заре своего существования, увидев молнию.

Плазма — это наиболее распространенное состояние вещества в природе. Внешняя поверхность земной атмосферы покрыта плазменной оболочкой — ионосферой. За пределами ионосферы в околоземном пространстве находятся так называ-

емые радиационные пояса, которые представляют собой своеобразные плазменные образования. Солнце и звезды можно рассматривать как гигантские сгустки горячей плазмы. Наконец, плазма заполняет всю Вселенную в виде очень разреженного газа. И, несмотря на то, что плазма является очень разреженной, ее масса составляет около 99% всей массы Вселенной. Без знания законов физики плазмы невозможно понять эволюцию звезд и Вселенной. В земных условиях с плазмой мы встречаемся при различных газовых разрядах, так как газовый разряд (молния, искра, дуга и др.) часто связан с возникновением плазмы.

В настоящее время плазма находит широкое применение в самых разных областях науки и техники: в газоразрядных источниках света, газовых лазерах, плазменных дисплеях, термоэмиссионных преобразователях внутренней энергии в электрическую энергию, магнитогидродинамических (МГД) генераторах. Если «обратить» МГД-генератор, то образуется плазменный двигатель, весьма перспективный для длительных космических полетов. Плазмотроны, создающие струи плотной низкотемпературной плазмы, широко применяются в различных областях техники.

Плазменные технологии используются для антикоррозионной и упрочняющей обработки металлов. С помощью плазменного напыления создают алмазоподобные пленки и тонкопленочные покрытия, кардинально изменяющие тр摩擦ционные и прочностные свойства материалов.

Химические реакции в плазме используются для получения химических соединений, которые нельзя получить в других условиях, например для получения соединений инертных газов. В настоящее время возникла новая наука, исследующая такие реакции, — плазмохимия, которая изучает химические процессы в низкотемпературной плазме, закономерности протекания реакций в ней и основы плазмохимической технологии. Во многих случаях плазмохимическая технология позволяет получать материалы и вещества, обладающие весьма ценными свойствами. В промышленности реализованы многие плазмохимические процессы: получение ацетилена и водорода из природного газа, азотной кислоты, винилхлорида, двуокиси титана и других важнейших промышленных продуктов.

Плазму используют как резец при плазменной резке и как шлифовальный камень при плазменной шлифовке и травлении поверхностей. Ионные пучки, получаемые с помощью плазмен-

ных источников, служат для введения малых добавок в полупроводники при конструировании интегральных схем, а плазменные струи — для нанесения защитных и упрочняющих покрытий на поверхности деталей. Но, конечно, основное будущее плазмы связано с той ролью, какую она призвана сыграть в решении одной из важнейших проблем XXI в. — овладении энергией управляемого термоядерного синтеза.

С педагогической точки зрения учебный материал по физике плазмы имеет огромное познавательное и мировоззренческое значение, а также представляет большой практический интерес. На этом материале решаются такие педагогические задачи, как создание политехнической направленности школьного курса физики, формирование естественно-научной картины мира, развитие познавательной активности и самостоятельности школьников.

Из сказанного следует вывод о том, что изучение плазменного состояния вещества должно занять достойное место в формировании системы знаний учащихся о веществе и составить органическую часть учения о веществе и его физических свойствах. В систематическом курсе физики изучить на достаточном уровне эти вопросы не представляется возможным из-за отсутствия времени. Элективный курс по выбору школьников позволяет дополнить знания школьников о четвертом состоянии вещества — плазме и сформировать у них более полное представление о физической картине мира.

Важной задачей данного элективного курса, наряду с углублением знаний о строении вещества, является формирование у школьников умений находить сведения по избранной теме в книгах, журналах и электронных источниках информации, готовить рефераты, выступать с докладами, проводить экспериментальные исследования, анализировать полученные результаты и формулировать выводы.

Содержание элективного курса «Плазма — четвертое состояние вещества» (35 ч)

1. Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях (6 ч)

Электромагнитное поле. Движение заряженной частицы в электрическом поле. Движение заряженной частицы в магнитном поле. Сила Лоренца. Движение заряженных частиц при наличии электрического и магнитного полей. Дрейф частиц.

Демонстрации

- Действие электростатического поля на электрические заряды;
- действие магнитного поля на движущиеся электрические заряды;
- электронно-лучевая трубка с электростатическим управлением электронным пучком;
- электронно-лучевая трубка с магнитным управлением электронным пучком;
- осциллограф;
- электростатические и магнитные линзы;
- движение электронных пучков в магнитном поле;
- фрагмент из кинофильма «Электронно-лучевая трубка».

2. Плазма. Основные характеристики плазмы (6 ч)

Электрический ток в газах. Виды электрических разрядов. Плазма. Степень ионизации плазмы. Коллективные свойства плазмы. Квазинейтральность плазмы. Дебаевский радиус экранирования. Температура плазмы.

Демонстрации

- Несамостоятельный и самостоятельный разряды в газах;
- коронный, дуговой, тлеющий и искровой разряды;
- фрагмент из кинофильма «Плазма — четвертое состояние вещества»;
- фрагменты из кинофильмов «Плазма в однородном магнитном поле» и «Плазма в неоднородном магнитном поле»;
- Диапозитивы (слайды), иллюстрации для кодоскопа (графопроектора) по темам «Электрический ток в газах», «Электродинамика».

3. Методы описания плазмы (2 ч)

Магнитная гидродинамика и неустойчивости плазмы. Вмороженность магнитного поля. Кинетическое описание плазмы. Диагностика плазмы.

Демонстрации

- Действие магнитного поля на плазменный шнур;
- сжатие плазмы магнитным полем;
- действие электрического и магнитного полей на плазму пламени.

4. Процессы в плазме (4 ч)

Идеальная (газовая) плазма. Колебания в плазме. Ленгмюровская частота колебаний. Волны в плазме.

Демонстрации

- Фрагмент из кинофильма «Плазма — четвертое состояние вещества».

5. Плазма в природе (4 ч)

Геомагнитное поле. Пояса радиации. Магнитосфера Земли. Магнитные бури и причины их возникновения. Строение и свойства ионосферы Земли. Солнечный ветер. Полярные сияния. Космическая плазма. Солнечные космические лучи.

Демонстрации

- Изучение магнитного поля Земли;
- вращение витка с током в магнитном поле Земли;
- диапозитивы: виды полярных сияний;
- кинофильм «Полярные сияния»;
- видеофильмы «Радиационные пояса планеты» и «Уроки из космоса».

6. Плазма в технике (6 ч)

Техническое применение плазмы. Плазменные генераторы (плазмотроны). Плазменный магнитогидродинамический генератор. Плазменный дисплей. Термоядерные реакции. Термоядерный реактор. Управляемый термоядерный синтез. Магнитные ловушки. Токамак.

Демонстрации

- Свечение газосветных трубок в поле высокой частоты;
- люминесцентная лампа;
- плазменный генератор релаксационных колебаний;
- применение дугового разряда.

7. Лабораторный практикум (6 ч)

1. Измерение отношения заряда электрона к его массе.
2. Измерение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли.
3. Регистрация космических лучей.
4. Изучение люминесцентной лампы.
5. Расчет периода электрических колебаний в RC-цепи и его экспериментальная проверка.

8. Обобщающее занятие (1 ч)

Физико-техническая конференция по теме «Плазма на Земле и в космосе».

Экскурсии

Возможные объекты: обсерватория, метеорологическая станция, лаборатории НИИ.

Конструкторское задание

Изготовление действующей модели МГД-генератора.

Методы проведения занятий

Основным методом изложения теоретического материала курса является активный диалог учителя с учащимися, предполагающий постановку проблемы с последующим обсуждением вариантов ее разрешения. Практика показывает эффективность совмещения лекции и диалога при работе с небольшой группой учащихся.

Лекционно-семинарская организация занятий должна сопровождаться демонстрациями, обсуждением докладов и рефератов, подготовленных школьниками, просмотром кино- и видеофильмов, выполнением учащимися творческих исследовательских и конструкторских заданий.

Использование лекционной формы проведения теоретических занятий целесообразно лишь при изучении наиболее сложных в теоретическом отношении разделов курса. Далее одной из ведущих форм занятий должны стать семинарские занятия и экспериментальные исследования. Они способствуют развитию умений самостоятельно приобретать знания, критически оценивать полученную информацию, излагать свою точку зрения по обсуждаемому вопросу, выслушивать другие мнения и конструктивно обсуждать их.

Темы предстоящих семинаров желательно объявлять заранее и предоставлять каждому учащемуся возможность выступить с основным сообщением на одном из занятий. Кроме основного докладчика выступает один или несколько содокладчиков или оппонентов, отстаивающих альтернативную точку зрения. При такой организации семинара становится возможной дискуссия по обсуждаемой проблеме, в которой могут принять участие все ученики.

Удачными для организации дискуссии могут служить, например, такие темы: «Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях», «Электрические разряды в газах», «Космическая плазма», «Полярные сияния», «Солнечный ветер», «Плазменный магнитогидродинамический генератор», «Управляемый термоядерный синтез», «Холодный термоядерный синтез — "за" и "против"» и др.

Практическое знакомство учащихся с экспериментальным методом изучения природы будет наиболее продуктивным, если его организовать в форме проведения небольших самостоятельных наблюдений, опытов и исследований. Исследовательские и конструкторские задания можно предлагать в качестве индивидуальных или групповых работ для 2–3-х учащихся по их выбору для выполнения в течение нескольких занятий.

Рекомендуется использование активных методов изучения материала: выполнение лабораторных работ физического практикума, решение задач по каждой теме, составление проектов с применением игровых элементов, поиск необходимой информации в литературе, Интернете и др.

Научный уровень предлагаемого курса достаточно высок. Но, поскольку это элективный курс, от каждого ученика не требуется воспроизведения всех изучаемых тем курса: кто-то интересуется теоретическими вопросами и с удовольствием будет готовить рефераты и делать доклады, а кому-то более интересно решать задачи или выполнять экспериментальные исследования. Важно, чтобы достижения каждого ученика стали достижением всех учащихся.

В качестве основной формы оценки достижений учащихся предлагается использовать результаты выступлений на семинарах, подготовленные доклады и рефераты, выполненные экспериментальные исследования. Желательно, чтобы о своих исследованиях ученики сделали сообщения на общем занятии с демонстрацией подготовленных экспериментов.

Решение задач в данном курсе не является главным фактором оценки успешности деятельности школьника. Вместе с тем, многие задачи, представленные в учебном и методическом пособиях, позволяют глубже усвоить теоретический материал элективного курса, а также лучше подготовиться к сдаче единого государственного экзамена, поступлению в вуз, продолжению образования.

1. Литература для учащихся

- Милантьев В. П., Темко С. В. Физика плазмы. — М.: Просвещение, 1983.
- Энциклопедический словарь юного физика /Сост. В. А. Чуянов. — М.: Педагогика, 1991.
- Энциклопедический словарь юного техника /Сост. Б. В. Зубков, С. В. Чумаков. — М.: Педагогика, 1988.
- Энциклопедический словарь юного астронома /Сост. Н. П. Ептылев. — М.: Педагогика, 1986.
- Энциклопедия для детей. — М.: Аванта +, 2000. — Том 16. Физика. — Ч. 1 и 2.

2. Литература для учителей

- Алексеев Б. В., Котельников В. А. Зондовый метод диагностики плазмы. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
- Арцимович Л. А. Элементарная физика плазмы. — М.: Атомиздат, 1969.
- Арцимович Л. А. Что каждый физик должен знать о плазме. — М.: Атомиздат, 1976.
- Арцимович Л. А., Лукьянов С. Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. — М.: Наука, 1972.
- Воронов Г. С. Штурм термоядерной крепости. — М.: Наука, 1985.
- Глазунов А. Т., Фабрикант В. А. Техническое использование плазмы. В кн. Физика и техника. — М.: Знание, 1977.
- Грановский В. Л. Электрический ток в газах. — М.: Наука, 1971.
- Димитров С. К., Фетисов И. К. Лабораторный практикум по физике газоразрядной плазмы и пучков заряженных частиц. — М.: МИФИ, 1989.
- Жданов С. К. и др. Основы физических процессов в плазме и плазменных установках. — М.: Наука, 1990.
- Капица П. Л. Плазма и управляемая термоядерная реакция (Нобелевская лекция). В кн. Эксперимент. Теория. Практика. — М.: Наука, 1987.
- Рабинович М. С. Управляемый термоядерный синтез. В кн. Школьникам о современной физике. /Сост. В. А. Угаров. — М.: Просвещение, 1974.
- Романовский М. К. Элементарные процессы и взаимодействие частиц в плазме. — М.: МИФИ, 1984.
- Смирнов Б. М. Введение в физику плазмы. — М.: Наука, 1982.

- Фабрикант В. А. Физика. Оптика. Квантовая электроника. Избранные статьи. — М.: МЭИ, 2000.
- Физический энциклопедический словарь. — М.: Советская энциклопедия. 1983.
- Фортов В.Е., Якубов И.Т. Неидеальная плазма. — М.: Энергоатомиздат, 1994.
- Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. — М.: Атомиздат, 1964.
- Чен Ф. Введение в физику плазмы. — М.: Мир, 1987.

3. Статьи в научно-популярных и научно-педагогических журналах

1. *Вокруг света* (№ 1, 2003) «Океан энергии» (с.22–25), «Сияющая ночь» (с.92–99), «Плазма» (с.192).
2. *Соросовский образовательный журнал*
Кингсепп А. С. Плазма как объект физических исследований. — 1996. — № 2.
- Райзер Ю. П. Непрерывный оптический разряд — поддержание и генерация плотной низкотемпературной плазмы лазерным излучением. — 1996. — № 3.
- Быковский Ю. А. Лазерно-плазменный источник ионов и ядер. — 1996. — № 9.
- Баранов В. Б. Что такое солнечный ветер. — 1996. — № 12.
- Пудовкин М. И. Солнечный ветер. — 1996. — № 12.
- Железняков В. В. От плазмы солнечной короны к плазме на нейтронных звездах. — 1997. — № 7.
- Шиканов А. С. Лазерный термоядерный синтез. — 1997. — № 8.
- Герштейн С. С. Загадки солнечных нейтрино. — 1997. — № 8.
- Кочаров Г. Е. О загадках Солнца. — 1998. — № 3.
- Ерухимов Л. М. Ионосфера Земли как космическая плазменная лаборатория. — 1998. — № 4.
- Курт В. Г. Солнце и межзвездная среда. — 1999. — № 1.
- Гальпер А. М. Радиационный пояс Земли. — 1999. — № 6.
- Бойко В. И. Управляемый термоядерный синтез и проблемы инерциального термоядерного синтеза. — 1999. — № 6.
- Славатинский С. А. Космические лучи и их роль в развитии физики высоких энергий и астрофизики. — 1999. — № 10.
- Рожанский В. А. Удержание плазмы в магнитных ловушках. — 2000. — № 10.
- Гильденбург В. Б. Плазменный резонанс в лаборатории и в верхней атмосфере. — 2000. — № 12.

3. Журнал «Квант»

Ашкенази Л. МГД-генератор. — 1980. — № 11.

Кикоин А. К. Полярные сияния. — 1989. — № 5.

Козловский. В. Электрическое действие пламени. — 1992. — № 10.

4. Журнал «Наука и жизнь»

Плотников А. «Термояд» в плазменном шнуре. — 1971. — № 3.

«ТОКАМАК-7» — еще один шаг к реактору. — 1980. — № 3.

Александров А., Елесин Е. Лед и пламень. — 1987. — № 11, 12.

Панкратов С. ТОКАМАК — новый шаг. — 1989. — № 4.

4. Материалы о плазме в Интернете

<http://www.inp.nsk.su/chairs/plasma/bookmark.ru.shtml>

— сайт «Физика плазмы в Интернете».

<http://www.membrana.ru/articles/global/2002/03/07/150800.html>

Холодный ядерный синтез — научная сенсация или фарс?

<http://phys.web.ru/db/msg.html?mid=1161258>

Человек, приручивший термояд (к 100-летию со дня рождения Л. А. Арцимовича).

<http://www.ug.ru/00.25/t48.htm>

Идея ТОКАМАК. Термоядерный синтез на земле близок к осуществлению.

<http://www.inno.ru/newstech.shtml>

Двести десять секунд Солнца.

<http://www.academic.ru/misc/enc3p.nsf/ByID/NT00047D22>

Энциклопедия: токамак.

<http://nauka.relis.ru/06/0109/06109051.htm>

Термояд: сквозь тернии к звездам.

<http://www.skc.ru/museum/page3.shtml>

На пути в будущее. (Из истории создания первых отечественных токамаков.)

1. Методика изложения темы «Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях»

На изучение этой темы программой отводится 6 часов, т. е. три двухчасовых занятия, из которых одно занятие следует посвятить изучению теоретического материала и анализу типовых задач, второе занятие — практикуму по решению задач, третье — семинару.

На первом занятии целесообразно дать краткую информацию об электрическом и магнитном полях, основанную на повторении и обобщении учебного материала, изученного в курсе физики 10-го класса. Акцент при этом делается на действие сил со стороны электрического и магнитного полей на заряженные частицы.

Сила, действующая на заряженную частицу со стороны электрического поля, равна: $\vec{F}_{эл} = q\vec{E}$, где $\vec{E}$ — напряженность электрического поля. Если заряд q положительный, то векторы $\vec{F}$ и $\vec{E}$ направлены в одну и ту же сторону; если заряд q отрицательный, эти векторы направлены в противоположные стороны.

Сила, действующая на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля, равна: $F_m = |q|vB \sin\alpha$, где F_m , $|q|$, v и B — модули силы, электрического заряда, скорости и вектора магнитной индукции, α — угол между векторами скорости и индукции магнитного поля. Направление силы $\vec{F}_m$ для положительно заряженной частицы определяется правилом левой руки (рис. 1.1). Если движется отрицательно заряженная частица, то пальцы левой руки следует располагать противоположно направлению вектора скорости (или воспользоваться правой рукой).

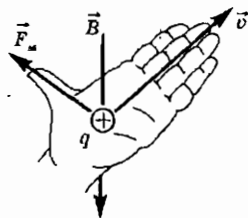


Рис. 1.1

На рис. 1.2 представлен новый комплект приборов для изучения тока в вакууме, с помощью которого можно продемонстрировать отклонение пучка заряженных частиц в магнитном поле. Он представляет собой плоский вакуумированный сосуд прямоугольной формы с тремя электродами. Катод выполнен в виде металлических нитей. Анод — это



Рис. 1.2

металлическая пластина, покрытая люминофором, который светится при ударах электронов, испущенных катодом при его нагревании (явление термоэлектронной эмиссии). Если приблизить к сосуду дугообразный магнит, то будет наблюдаться изменение яркости свечения областей анода, что позволяет косвенно судить об искривлении траекторий электронов.

Приведенный выше материал важен для понимания поведения плазмы, помещенной в электрические и магнитные поля, принципов действия плазменного магнитогидродинамического генератора (МГД-генератора), разнообразных устройств, необходимых для решения проблемы управляемого термоядерного синтеза (УТС), для объяснения образования полярных сияний и радиационного пояса Земли.

Кроме того, этот материал важен для решения многих проблем, не связанных непосредственно с физикой плазмы: это устройство и действие электронных микроскопов, электронных осциллографов, масс-спектрометров, разнообразных ускорителей заряженных частиц.

На первом занятии предлагается детально рассмотреть решение нескольких типовых задач, в которых заряженная частица движется в электрическом поле, магнитном поле и в скрещенных электрическом и магнитном полях. Эти задачи приведены в учебном пособии в практикуме по решению задач.

В качестве домашнего задания следует предложить учащимся ознакомиться с содержанием § 1–4 учебного пособия и проанализировать решение задач 1–8.

Второе занятие целесообразно посвятить решению комбинированных задач по теме «Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях».

В учебном пособии даны подробные решения восьми задач по этой теме. Там же приведены условия 15 задач для самостоятельного решения.

Внимание к задачам данного типа связано, во-первых, с тем, что при их решении повторяется и обобщается материал из разных тем курса физики, т. е. они являются комбинированными, позволяющими синтезировать знания из механики и электродинамики. Во-вторых, подобные задачи предлагаются как на выпускных экзаменах в школе, так и на вступительных экзаменах в вузы. В настоящее время во многих регионах Российской Федерации проводится эксперимент по введению единого государственного экзамена (ЕГЭ). В каждом варианте работы ЕГЭ имеются задания по теме «Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях».

Исходя из перечисленных выше аргументов, в содержание данного раздела методического пособия включены подробные решения наиболее важных задач по этой теме.

Движение заряженной частицы в электрическом поле

Задача 1. Электрон со скоростью $v = 5 \cdot 10^7$ м/с влетает в плоский конденсатор. Вектор скорости электрона лежит в плоскости, параллельной пластинам. Расстояние между пластинами конденсатора $d = 1$ см, его длина $L = 10$ см, разность потенциалов между обкладками конденсатора $U = 100$ В. Чему равно вертикальное смещение электрона на выходе из конденсатора?

Решение. Вертикальное смещение x равно:

$$x = \frac{at^2}{2} = \frac{eUt^2}{2md} = \frac{eUL^2}{2mdv^2},$$

где e — абсолютное значение заряда электрона (элементарный электрический заряд), m — масса электрона.

Подставив значения величин, получим:

$$x = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 0,35 \text{ см.}$$

Задача 2. На две пластины конденсатора, выполненные в виде проводящих сеток, падает параллельный пучок электронов под углом $\alpha = 30^\circ$ (рис. 1.3). Между пластинами поддерживается разность потенциалов $U = 600$ В. При какой минимальной кинетической энергии электроны смогут пройти через сетки?

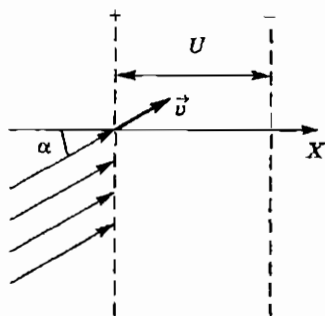


Рис. 1.3

Решение. Условие прохождения электронов через сетки запишем в виде:

$$eU = \frac{mv_x^2}{2} = \frac{m(v \cos \alpha)^2}{2},$$

где v_x — проекция вектора скорости $\vec{v}$ на направление вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ (ось X).

Искомое значение кинетической энергии электрона равно:

$$W_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{eU}{(\cos \alpha)^2}.$$

Подставив значения величин, получим:

$$W_k = \frac{4eU}{3} = 800 \text{ эВ} = 1,28 \cdot 10^{-16} \text{ Дж.}$$

Движение заряженной частицы в магнитном поле

Задача 3. Циклотрон ускоряет протоны до энергии $W = 500 \text{ МэВ}$. Найдите наибольший радиус орбиты, по которой движется протон в циклотроне, если индукция магнитного поля $B = 1 \text{ Тл}$.

Решение. Из выражения второго закона Ньютона:

$F = ma = \frac{mv^2}{R}$, где $F = evB$, и определения кинетической энергии:

$W = \frac{mv^2}{2}$ получаем искомое выражение: $R = \frac{\sqrt{2mW}}{eB}$,

$R = 10,3 \text{ м}$.

Задача 4. Частица массой m , обладающая зарядом q , влетает в однородное магнитное поле со скоростью $\vec{v}$ под углом α к вектору магнитной индукции $\vec{B}$. Чему равен радиус и шаг винтовой линии, по которой будет двигаться частица?

Решение. Разложим вектор скорости $\vec{v}$ частицы на две составляющие (рис. 1.4): $\vec{v}_1$, направленную вдоль линий магнитной индукции, и $\vec{v}_2$, перпендикулярную к этим линиям. Модули этих составляющих равны, соответственно:

$$v_1 = v \cos \alpha, \quad v_2 = v \sin \alpha.$$

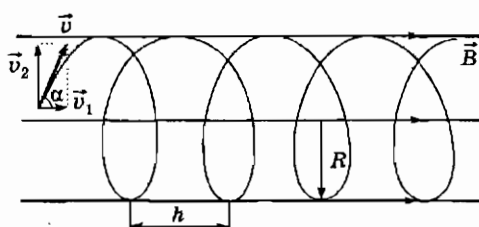


Рис. 1.4

На частицу действует сила Лоренца, зависящая от составляющей $\vec{v}_2$. Вследствие этого частица движется по окружности со скоростью v_2 в плоскости, перпендикулярной к вектору индукции магнитного поля. Радиус этой окружности можно рассчитать, составив уравнение на основании второго закона Ньютона: $qv_2B = \frac{mv_2^2}{R}$.

Отсюда радиус окружности равен:

$$R = \frac{mv \sin \alpha}{qB}. \quad (1)$$

Одновременно частица будет двигаться вдоль линий индукции магнитного поля с постоянной скоростью $\vec{v}_1$. Результатом этих двух движений будет винтовая линия, которая как бы навивается на линии индукции магнитного поля.

Шаг винтовой линии равен:

$$h = v_1 T = v T \cos \alpha, \quad (2)$$

где T — период обращения частицы по окружности со скоростью $v_2 = v \sin \alpha$:

$$T = \frac{2\pi R}{v \sin \alpha} . \quad (3)$$

Из совместного решения уравнений (1), (2) и (3) получим:

$$h = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{qB} .$$

Задача 5. Альфа-частица влетает в область однородного магнитного поля перпендикулярно линиям магнитной индукции (рис. 1.5). Модуль индукции $B = 0,1$ Тл. Размер области $h = 0,1$ м. Чему равна скорость частицы, если после прохождения магнитного поля частица отклонилась на угол $\varphi = 30^\circ$ от первоначального направления. Отношение заряда α -частицы к ее массе $q/m = 5 \cdot 10^7$ Кл/кг.

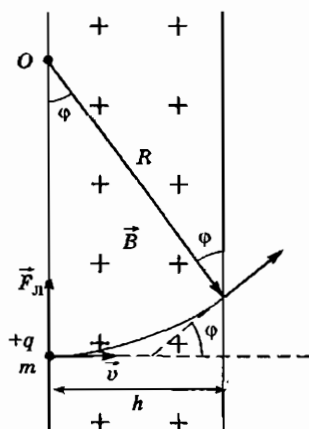


Рис. 1.5

Решение. В магнитном поле на α -частицу действует сила Лоренца $\vec{F}_L$, модуль которой $F_L = qvB$, где v — модуль скорости частицы. Эта сила сообщает частице центростремительное ускорение $a = \frac{v^2}{R}$, где R — радиус окружности, по дуге которой частица движется в магнитном поле.

В соответствии со вторым законом Ньютона уравнение движения имеет вид: $qvB = \frac{mv^2}{R}$, где m — масса частицы. Отсюда

$$v = \frac{q}{m} RB.$$

Как видно из рис. 1.5, $R = \frac{h}{\sin \varphi}$. Следовательно, модуль

$$\text{скорости равен: } v = \frac{q}{m} \cdot \frac{hB}{\sin \varphi} = 10^6 \text{ м/с.}$$

Задача 6. Из электронной пушки, ускоряющее напряжение между электродами которой $U = 600$ В, вылетает электрон и попадает в однородное магнитное поле с индукцией $B = 1,2$ Тл. Направление скорости составляет с направлением линий магнитной индукции угол $\alpha = 30^\circ$. Найдите ускорение электрона в магнитном поле. Отношение заряда электрона к его массе $e/m = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

Решение. Сила Лоренца $\vec{F}_L$, действующая на движущийся в магнитном поле электрон, сообщает ему ускорение $\vec{a}$. Согласно второму закону Ньютона $F_L = ma$, откуда

$$a = \frac{F_L}{m}. \quad (1)$$

Модуль силы Лоренца

$$F_L = evB \sin \alpha, \quad (2)$$

где v — модуль скорости электрона, с которой он вылетел из электронной пушки.

Изменение кинетической энергии электрона в электронной пушке равно работе электрического поля: $eU = \frac{mv^2}{2}$. Отсюда

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}. \quad (3)$$

С учетом выражений (2) и (3) формула (1) примет вид:

$$a = \frac{eB}{m} \sqrt{\frac{2eU}{m}} \sin \alpha; a \approx 1,53 \cdot 10^{18} \text{ м/с}^2.$$

Движение заряженных частиц при наличии электрического и магнитного полей

Задача 7. В пространстве, где одновременно существуют однородные электрическое и магнитное поля, по прямой линии с постоянной скоростью $v = 2 \cdot 10^6$ м/с движется протон. Чему равна индукция магнитного поля, если напряженность электрического поля равна $E = 2000$ В/м?

Решение. Электрон может двигаться прямолинейно и равномерно только при условии, что векторная сумма всех сил, действующих на него, равна нулю. В данном случае это возможно при равенстве по модулю сил, действующих на электрон со стороны скрещенных под углом 90° электрического и магнитного полей: $eE = evB$ (причем эти силы должны быть направлены в противоположные стороны).

Из равенства модулей сил следует, что индукция магнитного поля равна: $B = \frac{E}{v}$; $B = 10^{-3}$ Тл.

Задача 8. В масс-спектрограф влетают однозарядные ионы неона с одинаковыми зарядами, но разными массами ($m_1 = 20$ а.е.м., $m_2 = 22$ а.е.м.), предварительно пройдя фильтр скоростей, выделяющий ионы с одинаковой скоростью $\vec{v}$. Фильтр создан электрическим и магнитным полями, причем векторы напряженности и магнитной индукции взаимно перпендикулярны. Модули E и B этих векторов считать известными. Магнитная индукция $\vec{B}_0$ отклоняющего поля перпендикулярна пучку ионов. Ионы совершают половину оборота в отклоняющем магнитном поле. Чему равно расстояние между точками M и N (рис. 1.6)?

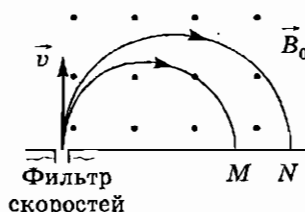


Рис. 1.6

Решение. Условием прямолинейного движения ионов в фильтре является равенство сил, действующих со стороны электрического и магнитного полей:

$$eE = evB,$$

где v — скорость ионов, прошедших фильтр. Для нее получается выражение:

$$v = \frac{E}{B}. \quad (1)$$

В масс-спектрографе ионы движутся по круговым орбитам под действием силы Лоренца, сообщаемой им центростремительное ускорение:

$$evB_0 = \frac{m_1 v^2}{R_1} \quad \text{и} \quad evB_0 = \frac{m_2 v^2}{R_2}.$$

Из этих выражений находим радиусы орбит ионов соответствующих масс:

$$R_1 = \frac{m_1 v}{eB_0}, \quad R_2 = \frac{m_2 v}{eB_0}. \quad (2)$$

Расстояние между точками M и N равно:

$$MN = 2(R_2 - R_1).$$

С учетом выражений для скорости (1) и радиусов (2) окончательно будем иметь:

$$MN = \frac{2E(m_2 - m_1)}{eBB_0}.$$

Задача 9. В циклотроне (рис. 1.7) поддерживается разность потенциалов между дуантами $U = 500$ В. Чему равна скорость иона бериллия Be^{2+} в конце конечной орбиты иона, если ион, двигаясь в магнитном поле с индукцией $B = 2$ Тл, успел совершить $N = 50\,000$ оборотов? Масса иона бериллия $m = 1,5 \cdot 10^{-26}$ кг.

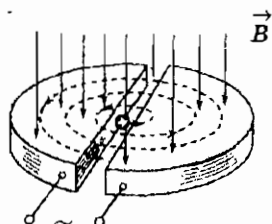


Рис. 1.7

Решение. Пройдя ускоряющее поле один раз, ион приобретает кинетическую энергию. В соответствии с законом сохранения энергии для движения электрона между дуантами можно записать:

$$qU = \frac{mv_1^2}{2}.$$

Отсюда выразим скорость:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2qU}{m}}.$$

Учитывая, что за N оборотов ион пройдет ускоряющее поле $2N$ раз, для его скорости получим:

$$v = 2\sqrt{\frac{NqU}{m}}; \quad v = 4,6 \cdot 10^7 \text{ м/с.}$$

В качестве домашнего задания следует предложить учащимся решить задачи из учебного пособия (с. 38–40).

Третье занятие целесообразно провести в форме семинара, к которому школьники готовят доклады и рефераты, посвященные разнообразным приборам и установкам, основанным на использовании закономерностей движения заряженных частиц в электрическом и магнитном полях. Материал к семинару можно найти в данном методическом пособии, а также в § 5 и 6 учебного пособия и в литературе, указанной в программе данного элективного курса.

Темы выступлений могут быть такими:

- Электронные линзы. Способы фокусировки электронных пучков с помощью электрических полей.
- Электронно-лучевая трубка.
- Электронный микроскоп.
- Магнитные линзы. Способы фокусировки электронных пучков с помощью магнитных полей.
- Масс-спектрографы.
- Ускорители заряженных частиц: циклотрон, бетатрон, синхротрон, фазотрон, синхрофазотрон.
- Ускорители со встречными пучками частиц.

Ниже приводится вспомогательный материал для подготовки сообщений по некоторым из затронутых тем, которого нет в учебном пособии.

Основные принципы масс-спектропии

Методы определения отношения заряда иона к его массе (q/M) важны для расчета масс ионов и запаса их энергии. Эти методы развиты в настоящее время очень широко и доведены до высокой степени совершенства. Они образуют самостоятельную отрасль экспериментальной техники, так называемую масс-спектропию. Наибольшее распространение получили системы, в которых для определения q/M используются комбинации электрических и магнитных полей. Первая достаточно эффективная система такого рода была построена Ф. У. Астоном в 1917 г.

На рис. 1.8 представлена схема масс-спектрометра Астона: O — ионный источник, S_1, S_2, S_3 — система апертурных диафрагм, AB — фотопластинка.

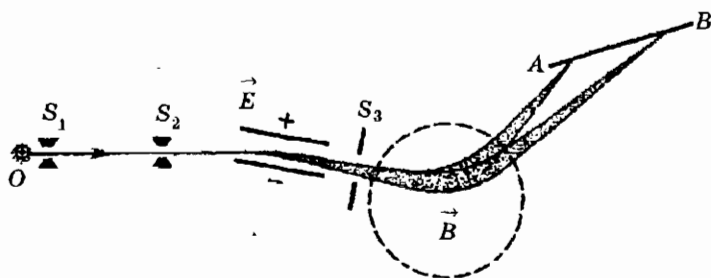


Рис. 1.8

Прибор Астона содержит все основные элементы современного масс-спектрографа. В этом приборе практически параллельный пучок ионов проходит сначала через отклоняющее электрическое поле между пластинами конденсатора, а затем через поперечное магнитное поле. Ионы с одинаковым значением q/M фокусируются в точках, расположенных вдоль линии AB , куда помещается фотографическая пластинка. С помощью этого прибора Астон измерил массы отдельных атомов и обнаружил, что у большого числа различных химических элементов существуют изотопы.

В приборе Астона была впервые осуществлена пространственная фокусировка ионов с различными начальными скоростями.

Американский физик А. Д. Демпстер построил масс-спектрометр иного типа. В нем в отличие от прибора Астона начальная энергия ионов практически одинакова.

Слегка расходящийся ионный пучок, прошедший ускоряющую разность потенциалов, попадает в поперечное магнитное поле и фокусируется после прохождения дуги окружности в 180° . На рис. 1.9 представлена схема масс-спектрометра Демпстера: 1 — ионный источник; 2 — камера ускорения ионов (ускоряющее напряжение создается между щелями S_1 и S_2); 3 — анализатор (линии индукции магнитного поля перпендикулярны плоскости чертежа); 4 — коллектор ионов; S_3 — входная щель приемника ионов.

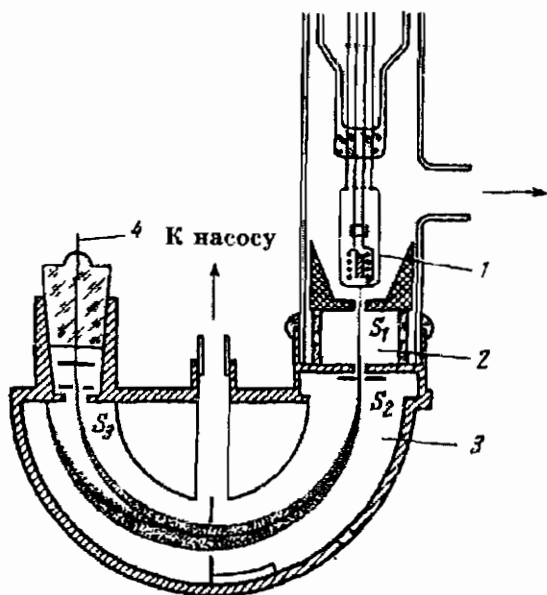


Рис. 1.9

Теория этого прибора очень проста: радиус кривизны ионной траектории в поперечном магнитном поле определяется известным выражением:

$$R = \frac{Mv}{qB}.$$

Так как все ионы проходят одну и ту же разность потенциалов U , то $\frac{Mv^2}{2} = qU$. Следовательно, можно рассчитать, на каком расстоянии L будут расположены точки фокусов для ионов с различной массой: $L = 2R = \frac{2}{B} \sqrt{\frac{2UM}{q}}$.

Электромагнитный метод разделения изотопов

Законы движения заряженных частиц в электрических и магнитных полях могут быть использованы не только для точного измерения атомных масс, но и для получения чистых изотопов в больших количествах для исследовательских и даже практических целей. Переход от масс-спектро스코пии к электромагнитной сепарации означал, несмотря на тождество принципов, лежащих в их основе, крупный шаг на пути технического прогресса.

Действительно, при разработке электромагнитного метода разделения изотопов требовалось увеличить силу тока в миллионы раз — от значений порядка десятых долей микроампера до значений порядка десятых ампера.

Разделение в технических масштабах обычно происходит внутри большой вакуумной камеры, помещенной между полюсами электромагнита (рис. 1.10). Типичный размер камеры, обычно прямоугольной формы, таков: 2500×1500×400 мм. Внутри ка-

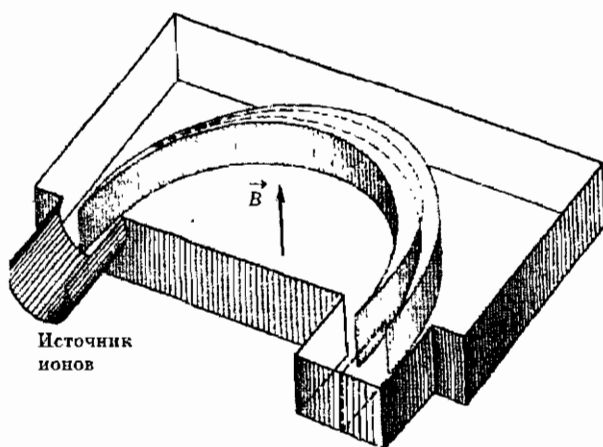


Рис. 1.10

меры располагаются источники ионов и приемники разделенных изотопов.

В дальнейшем для простоты будет рассмотрена система, содержащая только один ионный источник. Ионный пучок поступает в вакуумное пространство разделительной камеры из источника, который находится под большим положительным потенциалом (25–40 кВ) относительно металлических стенок камеры. Магнитное поле, так же как и в масс-спектрометре простейшего типа, сортирует ионы по массам и фокусирует ионные пучки; обычно используется фокусировка на 180° . Щели приемника разделенных изотопов помещаются в том месте камеры, где происходит фокусировка ионных пучков. Ионы каждого изотопа улавливаются на внутренних стенках предназначенной для него коробки приемника.

Кроме разделительных установок высокой производительности в настоящее время имеются сепараторы ионов лабораторного типа с меньшей производительностью, но высокой дисперсией; сепараторы для разделения изотопов радиоактивных элементов; сепараторы, предназначенные для анализа потоков вторичных частиц, возникающих при бомбардировке мишени ускоренными ионами; сепараторы, используемые в качестве ускорителей ионов при легировании материалов, и т. д.

Принцип действия и устройство циклотрона

Среди различных практических применений законов движения заряженных частиц в электрических и магнитных полях наибольшее значение для физики наших дней имеет ускорительная техника, которая превратилась за последние десятилетия в большую и самостоятельную научную область.

Для получения пучков ускоренных заряженных частиц применяются два метода, основанные на различных принципах.

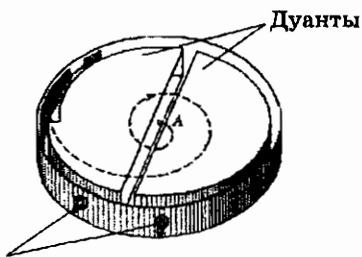
В одном из них для разгона частиц используется большая постоянная разность потенциалов. Эта разность потенциалов (порядка нескольких миллионов вольт) подается на высоковольтную вакуумную трубку, через которую проходит пучок ускоряемых частиц. В этом методе наиболее существенной частью установки является генератор высокого напряжения. Примером такого генератора может служить электростатическая машина Ван-де-Граафа. Генераторы указанного типа доведены до весьма высокой степени совершенства, но обладают од-

ним коренным недостатком: напряжение, которое реально удастся получить с их помощью, не превышает 15 млн В. При этом не видно путей существенного повышения этого предела.

В другом методе ускорение частиц осуществляется при помощи электрического поля высокой частоты. Пучок частиц заставляют много раз проходить в вакууме через ускоряющее поле и набирать энергию отдельными небольшими порциями. Окончательное значение энергии будет в этом случае равно произведению числа циклов, из которых состоит процесс ускорения, на значение энергии, приобретенной частицей в отдельном цикле. Такой принцип ускорения нашел исключительно удачное осуществление в циклотроне, построенном Э. О. Лоуренсом в 1931 г.

Работа циклотрона основана на том, что частота обращения иона в магнитном поле не зависит от энергии иона, если не учитывать зависимость его массы от скорости. Принципиальная схема циклотрона представлена на рис. 1.11. Два полых полуцилиндрических электрода — дуанта — располагаются на малом расстоянии друг от друга внутри вакуумной камеры, находящейся под непрерывной откачкой. Камера помещается между полюсами электромагнита, создающего сильное постоянное магнитное поле, линии индукции которого направлены перпендикулярно к средней плоскости дуантов.

Предположим, что между дуантами создано переменное напряжение, изменяющееся по закону $u = U_0 \cos \omega_0 t$, и что в точке А средней плоскости камеры в момент $t = 0$ появляется ион с нулевой начальной скоростью, обладающий массой m и зарядом q . Испытав ускорение и получив энергию qu , ион будет двигаться внутри дуанта, где нет электрического поля. Ион опишет в магнитном поле полуокружность и вновь подойдет к зазору между дуантами. Если частота ω_0 переменного напряжения, приложенного к дуантам, совпадает с ларморовской частотой $\omega = \frac{qB}{m}$, то ион, проходя через зазор, снова испытает ускорение.



К источнику переменного напряжения

Рис. 1.11

В дальнейшем через каждые полпериода процесс будет повторяться автоматически, и, двигаясь внутри дуантов, ион будет описывать траекторию, имеющую вид спирали и составленную из отдельных полуокружностей нарастающего радиуса (рис. 1.12).

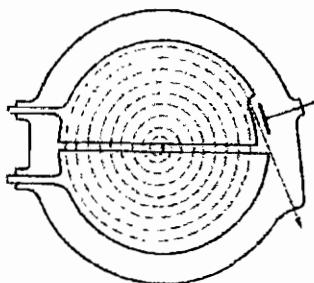


Рис. 1.12

Энергия иона в любой момент процесса ускорения определяется следующим образом (нерелятивистский случай).

Из уравнений $qvB = \frac{mv^2}{R}$ и $W_k = \frac{mv^2}{2}$ получаем:

$$W_k = \frac{q^2 B^2 R^2}{2m}.$$

Амплитуда U_0 ускоряющего напряжения не входит в полученную формулу. Это понятно, так как при увеличении напряжения уменьшается число оборотов, которое должен совершить ион, чтобы достигнуть данного значения R .

Принцип действия бетатрона

В бетатроне для ускорения электронов используется индуцированное электрическое поле, возникающее при изменении во времени магнитного потока.

Рассмотрим поведение электрона, находящегося в начальный момент в точке A в области переменного магнитного поля.

Магнитное поле обладает аксиальной симметрией, а линия напряженности вихревого электрического поля является окружностью. Пусть начальная скорость электрона равна нулю; тогда под действием электрического поля он станет двигаться в плоскости, перпендикулярной линиям индукции магнитного поля. Направление его скорости сначала будет антипараллельно направлению вектора напряженности электрического поля. Од-

нако как только электрон приобретет некоторую скорость, на него начнет действовать магнитное поле (рис. 1.13).

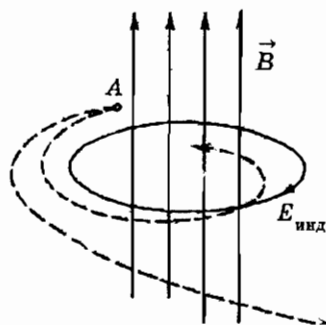


Рис. 1.13

Допустим, что индукция магнитного поля в точке A равнялась нулю, когда электрон покоился. Если бы и в дальнейшем магнитная индукция в области движения электрона оставалась равной нулю, то электрон стал бы двигаться по раскручивающейся спирали. Если же магнитное поле в области движения электрона быстро нарастает, а вихревое электрическое поле невелико, так что импульс электрона увеличивается очень медленно, то движение электрона будет происходить по стягивающейся спирали (это следует из равенства $p = eBR$ при $p = \text{const}$).

Отметим, что напряженность индуцированного электрического поля не определяется однозначно изменением магнитного поля в том месте, где движется электрон, а определяется скоростью изменения потока во всем пространстве, охватываемом линией напряженности вихревого поля.

Возникает вопрос, нельзя ли найти условие, при котором электрон, оказавшись на круговой линии вихревого поля, будет продолжать двигаться вдоль этой линии, совершая оборот за оборотом, постепенно увеличивая свою энергию в возрастающем магнитном поле? Принципиальное решение этого вопроса было найдено норвежским инженером Видероз еще в 1927 г., однако должно было пройти свыше двенадцати лет, прежде чем эти идеи удалось довести до такой степени совершенства, чтобы построить на их основе действующий ускоритель.

Выведем условие, при соблюдении которого ускоряемый электрон будет неизменно оставаться на круговой орбите постоянного радиуса. Движение электрона в вихревом электриче-

ском и переменном магнитном поле определяется двумя основными уравнениями: $\frac{\Delta p}{\Delta t} = eE$ и $p = eBR$. Используя соотношение между скоростью изменения магнитного потока и напряженностью вихревого электрического поля: $2\pi RE = \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right|$, можно получить простое условие: $B(t) = \frac{1}{2} \bar{B}(t)$, где $\bar{B}(t)$ — среднее значение индукции магнитного поля по поверхности, охватываемой орбитой постоянного радиуса.

Итак, электрон будет неограниченно долго двигаться по орбите неизменного радиуса в нарастающем магнитном поле при выполнении условия: $B(t) = \frac{1}{2} \bar{B}(t)$. Эту орбиту называли равновесной. Если электрон начал свое движение по орбите, близкой к равновесной, то в дальнейшем его орбита будет деформироваться и постепенно приближаться к равновесной.

Важным элементом конструкции бетатрона (рис. 1.14) является тороидальная вакуумная камера, в которой происходит процесс ускорения. Камера обычно изготавливается из фарфора и откачивается до высокого вакуума. Внутри нее размещается инжектор — электронная пушка простой конструкции. Задняя стенка инжектора используется в качестве мишени, на которую попадают электроны, сброшенные в конце ускорения с равновесной орбиты. Изнутри камера покрывается тонким слоем металла. Металлизация служит для удаления электрических зарядов, которые легко возникают на поверхности диэлектрика и могут создавать поля, полностью расстраивающие процесс ускорения. Слой металла должен быть достаточно тонким, чтобы его

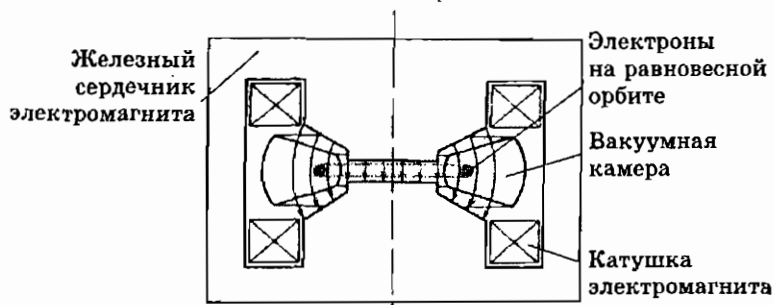


Рис. 1.14

сопротивление было достаточно велико и, следовательно, вихревые токи в металле были бы незначительны.

Камера помещается в зазоре электромагнита, создающего переменное магнитное поле, обладающее аксиальной симметрией. Конструкция электромагнита и выбор формы полюсных наконечников обеспечивают выполнение бетатронного условия на некоторой окружности тороидальной камеры. Для уменьшения потерь на токи Фуко в электромагните применяется «трансформаторное железо» (кремнистая сталь): сердечник набирают из тонких железных листов, изолированных друг от друга. Так как потери в железе оказываются все же значительными, то принимаются меры к интенсивному воздушному охлаждению сердечника. Изготовление деталей и сборка электромагнита должны производиться с большой тщательностью и точностью для достижения строгой азимутальной симметрии поля. Магнитное поле во всех точках вдоль равновесной орбиты должно изменяться во времени строго по одному и тому же закону.

Бетатроны малой мощности нашли широкое применение при дефектоскопических исследованиях в промышленности и медицине.

Понятие о современных установках, ускоряющих частицы до высоких энергий

Развитие ускорительной техники направлено на достижение все больших энергий частиц. Если в 1940 г. предельная энергия, до которой могли быть ускорены протоны, не превышала 8 МэВ, то в настоящее время существуют ускорители с энергией протонного пучка свыше 200 ГэВ.

Этот огромный скачок на протяжении жизни одного поколения физиков мог произойти лишь потому, что были высказаны и реализованы новые принципы конструктивного осуществления ускорителей. Они возникли в связи с преодолением тех трудностей, которые мешали дальнейшему развитию таких, ставших теперь уже классическими, установок, как бетатрон и циклотрон.

Синхротрон. В бетатроне росту энергии препятствует, с одной стороны, быстрое увеличение массы установки, а следовательно, и стоимости, а с другой стороны, возрастание потерь энергии на электромагнитное излучение. Эти трудности можно преодолеть, если освободить переменное магнитное поле от выполнения одной из функций, которую оно несет в бетатроне, а именно от функции индукционного ускорения частицы.

В этом случае ускорение частиц можно осуществлять с помощью высокочастотного электрического поля, создаваемого на каком-либо участке орбиты. Магнитный поток, пронизывающий орбиту, оказывается теперь ненужным, и область, которую должно занимать магнитное поле, сводится к кольцевой дорожке, вдоль которой разгоняются электроны. Таким образом, на магнитное поле возлагаются только функции удержания частиц, ускоряемых на этой дорожке. Ускоритель подобного типа получил название синхротрона. На рис. 1.15 представлена конструкция синхротрона.

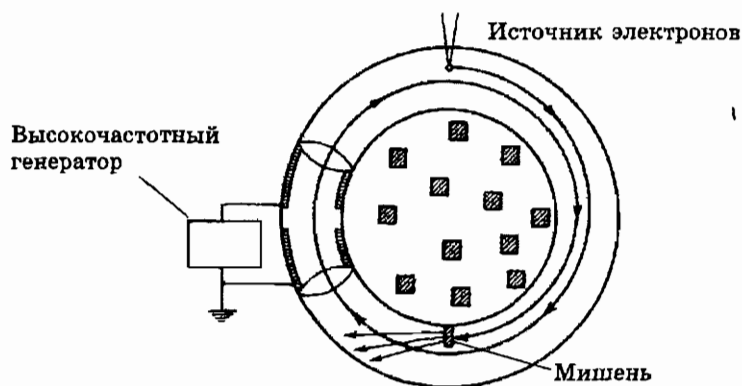


Рис. 1.15

Фазотрон. Фазотроны предназначены для ускорения тяжелых частиц. Увеличению предельной энергии частиц в циклотроне препятствуют релятивистские эффекты. Для преодоления этой трудности нужно перейти к использованию высокочастотного напряжения с изменяющейся частотой. Частота должна изменяться на протяжении процесса ускорения в соответствии с возрастанием импульса частиц. При выполнении этого условия фаза частицы будет оставаться постоянной или будет изменяться в допустимых пределах. В этом случае исчезает понятие «предельной энергии», и получение ионов с энергиями в несколько сотен мегаэлектронвольт не будет связано с необходимостью создавать между дуантами напряжение с чрезмерно высокой амплитудой.

Итак, основное различие между фазотроном и циклотроном заключается в том, что в фазотроне частота ускоряющего напряжения периодически изменяется. Это приводит к тому, что

работа фазотрона приобретает прерывистый характер, совершенно так же, как и работа синхротрона и вообще всех ускорителей с автофазировкой.

Для получения ионов с энергией, значительно превышающей «потолок» циклотронного метода, ускорительная техника пошла по пути сооружения фазотронов.

Важнейшей проблемой является выяснение возможностей создания в фазотронах устойчивого сгустка частиц, который бы не распался в процессе ускорения. Возможность создания такого устойчивого сгустка вытекает из принципа автофазировки, который открыл в 1944 г. в Советском Союзе В. И. Векслер, а в 1945 г. в США Э. Мак-Миллан. Суть этого принципа заключается в следующем.

Если бы в фазотроне ускорялись только те частицы, частота которых точно совпадает с частотой изменения поля, то не имело бы смысла создавать установку, так как число таких равновесных частиц ничтожно мало. Векслер показал, что ускоряться будет сгусток частиц, для которых условие синхронизации выполняется приближенно. Эти частицы сначала разгоняются быстрее равновесных и опережают их — тогда поле начинает их тормозить; когда же их скорость станет несколько меньше скорости обращения равновесных частиц, поле опять станет их разгонять. В результате этого процесса частицы в сгустке ускоряются, но их энергия не возрастает монотонно, а колеблется около значения энергии равновесных частиц. Число частиц в сгустке на несколько порядков больше числа равновесных частиц.

Сразу же после открытия Векслера и Мак-Миллана были построены крупные фазотроны, на которых интенсивно проводились исследования по физике элементарных частиц. Один из больших действующих фазотронов был сооружен в 1950 г. в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне. На рис. 1.16 показан его внешний вид. С помощью этого ускорителя был получен пучок протонов с энергий 680 МэВ.

Сравнительно малая сила тока протонного пучка — основной недостаток фазотронов. Именно это обстоятельство побудило физиков вернуться к одной старой идее, высказанной еще в 1938 г. Речь идет о так называемом изохронном циклотроне, или циклотроне с азимутальной вариацией магнитного поля. В этом ускорителе период обращения иона, несмотря на релятивистский рост импульса, остается постоянным.

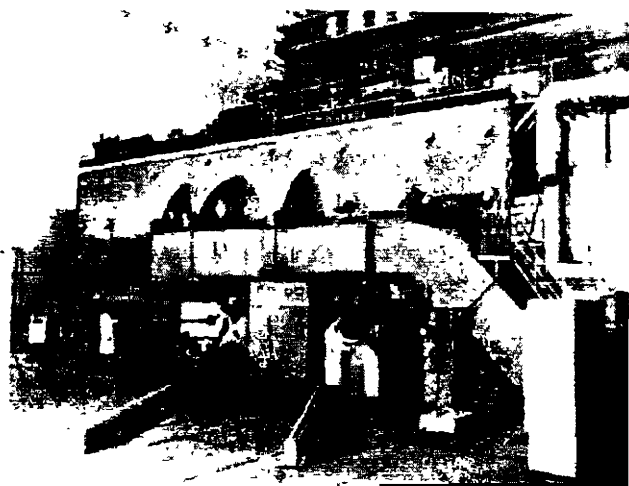


Рис. 1.16

Современный изохронный циклотрон представляет собой универсальный ускоритель, в котором можно плавно и в широком диапазоне изменять энергию частиц в выведенном пучке, чего классический циклотрон, как правило, не позволяет делать. Ассортимент ускоряемых частиц тоже очень широк — на данной установке по желанию можно ускорять протоны, дейтроны, α -частицы, ионы гелия, лития, углерода и т. д. Энергия ускоряемых частиц в современных изохронных циклотронах достигает 500 МэВ.

Синхрофазотрон. Быстрое увеличение массы установки и ее стоимости с ростом энергии приводит к тому, что сооружения фазотронов на энергии протонов свыше 10^6 МэВ становятся нерациональными. Для овладения более высоким энергетическим диапазоном можно скомбинировать принципы, заложенные в основу синхротрона и фазотрона. Установки, основанные на использовании комбинации этих принципов, носят название синхрофазотронов. В такой системе протоны разгоняются в зазоре кольцевого электромагнита с переменным магнитным полем, причем для ускорения используется высокочастотное напряжение с модулированной частотой.

На протяжении одного цикла ускорения индукция ведущего магнитного поля возрастает по линейному закону:

$$B(t) = B_0(1 + \alpha t).$$

Длительность этого процесса и, соответственно, длительность ускорения частиц составляет 1–3 с. В то же время частота ускоряющего напряжения также растет по определенному закону. Если закон роста $B(t)$ можно считать, в известных пределах, произвольным, то закон изменения частоты уже жестко задается принятым законом $B(t)$.

Для соблюдения закона $\omega(B)$ с требуемой точностью придуман ряд весьма остроумных систем, включающих датчики индукции магнитного поля на орбите, датчики положения пучка по отношению к центру сечения камеры, системы обратной связи и прецизионные методы быстрой коррекции частоты колебаний, вырабатываемых высокочастотными генераторами с модулированной частотой. Эта высокочастотная система — наиболее сложная и тонкая часть синхрофазотрона. Как правило, в синхрофазотронах ускоряют только протоны. Протон проходит несколько этапов ускорения: после ионного источника он ускоряется в высоковольтном ускорителе примерно до 1 МэВ, затем вводится в резонансный линейный ускоритель, где ускоряется до 5–10 МэВ, и только из этого ускорителя вводится в кольцевую камеру синхрофазотрона.

Значительное уменьшение массы электромагнита синхрофазотрона достигается за счет использования жесткой фокусировки. Только после открытия принципа жесткой фокусировки появилась возможность проектирования и сооружения кольцевых протонных ускорителей на десятки и сотни гигаэлектронвольт.

Первый такой синхрофазотрон на 28 ГэВ был запущен в Европейском Центре ядерных исследований (ЦЕРНе) близ Женевы в 1960 г. Масса железа — 3000 т, интенсивность пучка — 10^{12} протонов/импульс. Заметим, что для сооружения слабофокусирующего синхрофазотрона с такими же параметрами пришлось бы израсходовать свыше 1 млн т железа.

В конце 1967 г. получен пучок протонов с энергией 76 ГэВ на синхрофазотроне Института физики высоких энергий под Серпуховом. Его основные параметры таковы: радиус кольцевой камеры 230 м, длина линейного ускорителя 1,5 км, масса железа 20 000 т, энергия инжекции 100 МэВ, интенсивность — 10^{12} протонов/импульс при частоте следования протонных импульсов 7,5 с. Рис. 1.17 дает представление о кольцевой магнитной системе этого ускорителя.

В 1972 г. в США (Иллинойс) вступил в строй синхрофазотрон, дающий пучок протонов с энергией 200 ГэВ.

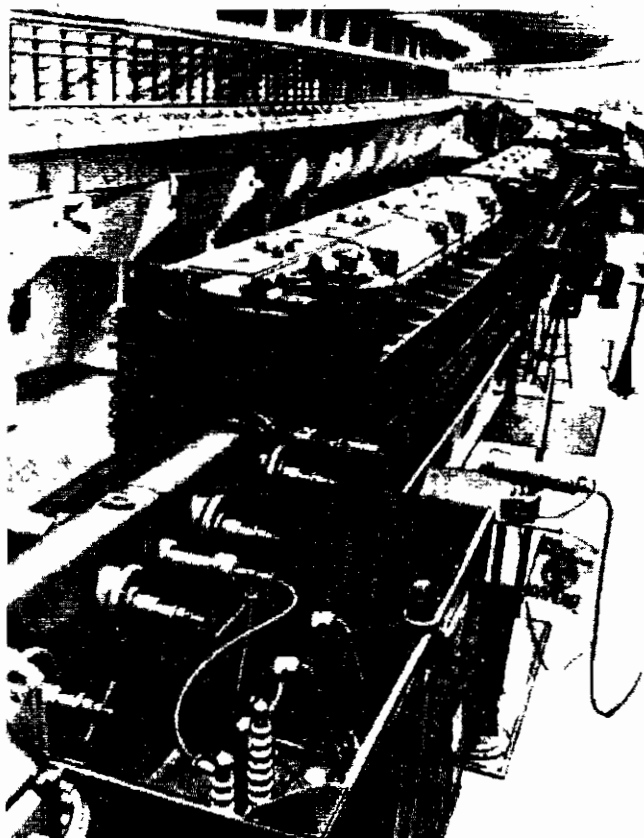


Рис. 1.17

В таблице приведены сведения о крупнейших циклических ускорителях, созданных в разных странах с 1954 г. по настоящее время.

Крупнейшие циклические резонансные ускорители

Местонахождение	Максимальная энергия, ГэВ	Диаметр установки, м	Год запуска
<i>Протонные синхрофазотроны</i>			
Дубна	10	72	1957
Женева (Швейцария)	28	200	1959
Брукхейвен (США)	33	257	1960
Серпухов	76	472	1967
Женева (Швейцария)	400	2200	1975
Батейвия (США)	500	2000	1972
Серпухов	3000	6000	1980
<i>Ионные синхрофазотроны</i>			
Беркли (США)	2 ГэВ/нуклон	—	1980
Дубна	4 ГэВ/нуклон	—	1970
<i>Синхротроны</i>			
Ереван	6,1	69	1967
Гамбург (ФРГ)	7,5	101	1964
Корнелл (США)	12,2	250	1967
<i>Фазотроны</i>			
Женева (Швейцария)	0,60	5,0	1957
Дубна	0,68	6,0	1953
Ленинград	1,00	6,9	1968
<i>Изохронные циклотроны</i>			
Ванкувер (Канада)	0,52	12	1974
Цюрих (Швейцария)	0,59	9	1974

В качестве домашнего задания следует предложить учащимся ознакомиться с содержанием § 5–6 учебного пособия.

2. Методика изложения темы «Плазма. Основные характеристики плазмы»

На изучение этой темы программой отводится 6 часов. Из них целесообразно 2 часа отвести на лекцию, 2 часа — на семинар и 2 часа на решение задач.

Лекция «Понятие о плазме»

Тема «Электрический ток в газах» важна для понимания механизма образования плазмы. Кроме того, при ее изучении можно поставить ряд ярких демонстраций видов газового разряда. Так как эта тема изучается лишь в школах и классах с углубленным изучением физики, необходимо выделить время для ознакомления с ее основными положениями. Наиболее целесообразно поручить нескольким ученикам подготовить доклады, в которых были бы рассмотрены такие вопросы, как самостоятельный и несамоостоятельные разряды в газах; тлеющий разряд; искровой разряд; дуговой разряд; коронный разряд, а также сопроводить свои выступления соответствующими демонстрациями.

Важно подчеркнуть, что идеальный газ не содержит заряженных частиц, а, следовательно, является диэлектриком. Для создания электрического тока в газе необходимо его ионизовать — создать носители электрического заряда. В газе — это электроны, положительные и отрицательные ионы. Прхождение электрического тока через газ называется *газовым разрядом*.

Для того чтобы в газе возник самостоятельный разряд, недостаточно наличия одного лишь процесса ударной ионизации. Нужно еще, чтобы за счет процессов, происходящих в газе при разряде, непрерывно возникали электроны, которые после ускорения принимали бы участие в ударной ионизации. Таких

процессов может оказаться несколько. Иногда они действуют одновременно, иногда один из них начинает играть доминирующую роль — это зависит от давления газа, его температуры и напряженности электрического поля. Рассмотрим важнейшие из них.

Термоэлектронная эмиссия с катода возникает в том случае, когда катод имеет высокую температуру. Именно этот процесс обеспечивает *дуговой разряд*.

Вторичная электронная эмиссия с катода возникает, если кинетическая энергия положительных ионов оказывается достаточной для того, чтобы ионы при ударе о катод могли выбить из него электроны. Этот процесс обеспечивает *тлеющий разряд*.

Термоионизация газа происходит в тех случаях, когда кинетическая энергия молекул газа превышает энергию ионизации:

$$\bar{E}_k > U_i, \text{ где } \bar{E}_k = \frac{3}{2} kT. \text{ Нетрудно убедиться, что ионизация газа}$$

при тепловых соударениях молекул возможна лишь при температурах $T > \frac{2U_i}{3k}$. Вычисления показывают, что $T \approx 10^5$ К.

Фотоионизация газа происходит под действием коротковолнового ультрафиолетового или рентгеновского излучений. Молекула газа, поглотив квант излучения, энергия которого больше энергии ионизации, выбрасывает электрон и превращается в положительный ион.

Объясняя материал § 7 учебного пособия, в котором рассматривается прохождение электрического тока в газах, следует обратить особое внимание на то, что взаимодействие носителей заряда друг с другом несущественно из-за их малой концентрации. Это относится в еще большей степени к прохождению тока через жидкости. Основную роль здесь играет взаимодействие электронов или ионов с нейтральными частицами — атомами и молекулами.

Однако существует целый ряд явлений, в которых взаимодействие заряженных частиц друг с другом играет определяющую роль. В таких случаях говорят о проявлении плазменных свойств. Что же такое плазма?

Ионизованный газ при значительной степени ионизации представляет собой фактически особое состояние вещества, отличное от газообразного, жидкого или кристаллического. Это особое — четвертое — состояние вещества называется *плазмой*.

Понятие плазмы как четвертого состояния вещества было введено для того, чтобы отделить плазму, обладающую специфическими свойствами, от твердого, жидкого и газообразного состояний вещества. При такой классификации исходят прежде всего из энергетических соображений.

Если взять какое-либо вещество при температуре, близкой к абсолютному нулю, и нагревать его, то, пока кинетическая энергия частиц вещества E_k будет значительно меньше потенциальной энергии их взаимодействия W ($E_k \ll W$), вещество находится в твердом состоянии. Если при повышении температуры кинетическая энергия частиц становится соизмеримой с W , но меньшей энергии E_v , характерной для ван-дер-ваальсова взаимодействия, то мы будем иметь дело с жидкостью ($W \leq E_k \leq E_v$). С дальнейшим ростом температуры, если энергия частиц будет меньше энергии ионизации частиц U_i ($E_v \leq E_k \leq U_i$) вещество переходит в газообразное состояние. Плазменное состояние получится в том случае, когда $E_k \geq U_i$.

Плазма, возникающая в результате ударной ионизации газа, называется *газоразрядной*. Ее отличительная особенность заключается в том, что в ней практически отсутствует обмен энергией между свободными электронами и ионами, и их средние кинетические энергии значительно отличаются друг от друга. Это качественно объясняется тем, что длина свободного пробега электрона много больше, чем у иона (примерно в 5–10 раз), вследствие чего электроны накапливают в электрическом поле большую энергию, чем ионы.

По аналогии с температурой газа, которая вводится на основании формулы $\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT_i$, можно ввести *ионную температуру*

и *электронную температуру*: $T_e \approx \frac{2\bar{E}_{ke}}{3k}$ и $T_i \approx \frac{2\bar{E}_{ki}}{3k}$. Оказывается,

что $T_e \approx 5000$ К, а $T_i \approx 300$ К.

Итак, газоразрядная плазма — это неравновесное или, как говорят, *неизотермическое* состояние вещества.

Высокотемпературная плазма, возникающая в результате термической ионизации, является равновесной или, другими словами, *изотермической* плазмой. Степень ее ионизации очень велика, благодаря чему она представляет собой очень хороший проводник — проводимость высокотемпературной плазмы сопоставима с проводимостью металлов.

Температура поверхности Солнца и звезд равна нескольким тысячам кельвин, их недра разогреты до миллионов кельвин. Отсюда следует, что значительная масса вещества Вселенной, сконцентрированная в звездах, находится в состоянии высоко-температурной плазмы.

В учебном пособии в § 8 дается следующее определение плазмы:

Плазмой называется квазинейтральная система заряженных частиц, т. е. частично или полностью ионизованный газ, в котором объемные плотности положительных ρ_+ и отрицательных ρ_- зарядов практически одинаковы по абсолютному значению: $\rho_+ = |\rho_-|$ или $\rho_+ + \rho_- = 0$.

В качестве домашнего задания следует предложить учащимся ознакомиться с содержанием § 7–8 учебного пособия.

Семинар «Основные характеристики плазмы»

Степень ионизации определяется отношением концентрации ионизованных атомов к общей их концентрации: $\alpha = \frac{n_i}{n_n}$. Это по-

нятие важно для понимания того, что в обычной воздушной среде при комнатной температуре степень ионизации плазмы ничтожно мала: кинетическая энергия молекул газа E_k много меньше энергии ионизации U_i . И лишь при высоких температурах концентрация ионизованных атомов становится больше концентрации нейтральных молекул и степень ионизации плазмы существенно возрастает.

Коллективное движение частиц в плазме. Особые свойства плазмы обусловлены сильным воздействием, которое оказывают электрические и магнитные поля на движение заряженных частиц. В газе, состоящем из нейтральных частиц, информация о локальном изменении состояния, например, об увеличении концентрации частиц в каком-либо месте, передается только в результате столкновения частиц. В плазме, в отличие от газа, в котором нейтральные частицы взаимодействуют друг с другом только на малых расстояниях, заряженные частицы взаимодействуют с помощью дальнедействующих кулоновских сил. При локальном изменении состояния в плазме создаются электрическое и магнитное поля, которые действуют на всю плазму в целом. В результате в плазме возникают коллективные движения частиц — колебания и волны.

Скорость передачи информации о локальных возмущениях определяется скоростью распространения электромагнитных волн в плазме. Именно наличие таких специфических коллективных процессов в плазме — волн, в которых происходят колебания как частиц плазмы, так и сопровождающих движение заряженных частиц электромагнитных полей, — и позволяет говорить о плазме как о четвертом агрегатном состоянии вещества.

В общем случае можно считать, что плазма представляет собой смесь трех компонент: свободные электроны, положительные и отрицательные ионы и нейтральные атомы (или молекулы). Электроны — это наиболее подвижная часть плазмы, и именно с движением электронов связаны ее наиболее интересные свойства. Ионы же вследствие гораздо большей массы ведут себя более «пассивно», благодаря чему во многих случаях можно вообще пренебречь их движением и рассматривать ионную часть плазмы как неподвижный положительный фон, на котором происходит движение электронов. Такое допущение однокомпонентной плазмы еще более оправдано для электронов в металлах, где движение ионов вообще ограничено колебаниями вблизи положения равновесия.

Квазинейтральность плазмы. Дебаевский радиус. Как следует из определения плазмы, важнейшим свойством плазмы является ее стремление к сохранению равенства плотностей электрического заряда положительных и отрицательных частиц. В самом деле, при высокой плотности заряженных частиц в плазме даже малое пространственное разделение положительных и отрицательных зарядов привело бы к появлению очень сильных электрических полей, стремящихся восстановить локальное нарушение электронейтральности. Поэтому в среднем (в достаточно большом объеме или за достаточно большой промежуток времени) плазма должна быть почти нейтральной, или, как говорят, *квазинейтральной*.

На свойстве квазинейтральности плазмы остановимся подробнее, так как оно имеет существенное значение и, в конечном счете, в нем содержится самое важное для понимания понятия «плазма».

Возникает естественный вопрос: с какой степенью точности в ионизованном газе должно соблюдаться условие квазинейтральности? Каким бы путем ни создавалась ионизация газа (нагревом, облучением, бомбардировкой частицами), заранее совсем не очевидно, что положительных и отрицательных зарядов

будет поровну. Из-за различия в скоростях движения электронов и ионов электроны могут с большей легкостью покидать область, в которой они возникли, чем ионы. Поэтому если благодаря процессам ионизации атомов первоначально образуется одинаковое число зарядов противоположных знаков, то из-за быстрого исчезновения электронов на стенках аппаратуры, внутри которой находится ионизованный газ, ионы, казалось бы, должны оставаться в значительно большем числе, т. е. ни о какой нейтральности не должно быть и речи. Однако нужно учесть, что при преимущественной утечке зарядов одного знака (электронов) в ионизованном газе немедленно образуется избыточный заряд другого знака, который способствует выравниванию потока электронов и ионов и препятствует увеличению разницы между концентрациями частиц обоих знаков.

Условия, при выполнении которых этот эффект будет достаточен для того, чтобы поддерживать квазинейтральность, можно разъяснить с помощью следующих соображений.

Допустим для простоты, что в ионизованном газе присутствуют, кроме электронов, только однозарядные ионы. Квазинейтральность означает, что n_e очень мало отличается от n_i .

Как отразится на поведении отдельных частиц заметное отклонение n_e от n_i ? Очевидно, что все будет зависеть от того, насколько сильным окажется обратное влияние электрического поля, возникающего при таком отклонении, на движение заряженных частиц.

Здесь сразу же выделяются два крайних случая.

Если число заряженных частиц в объеме невелико, то создаваемые ими электрические поля слишком слабы для того, чтобы повлиять на их движение. В этом случае отдельные электроны и ионы в своем поведении никак не связаны друг с другом и каждая из частиц движется так, как будто бы все другие отсутствуют. Следовательно, условие квазинейтральности здесь не обязательно выполняться.

Противоположный случай соответствует ионизованному газу с высокой концентрацией заряженных частиц, занимающему достаточно большой объем. В этом случае избыточные заряды, возникающие при сильном нарушении равенства между n_e и n_i , создают электрические поля, достаточные для выравнивания потоков и восстановления квазинейтральности.

В конечном счете, все зависит от соотношения между потенциальной энергией отдельного иона или электрона в электрическом поле, возникающем при нарушении квазинейтральности,

и средней кинетической энергии частиц, связанной с их тепловым движением. Если потенциальная энергия W , соответствующая заметному отклонению концентрации электронов n_e от концентрации ионов n_i , будет значительно превышать величину kT_e , которая является мерой энергии теплового движения электронов, то условие квазинейтральности будет соблюдаться с достаточно хорошей точностью. Анализируя соотношение между W и kT_e более детально, можно прийти к простому количественному критерию, характеризующему условия, при которых квазинейтральность сохраняется: $r_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT_e}{n_e e^2}}$.

При выполнении соотношения:

$$r \approx \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT_e}{n_e e^2}}, \quad (1)$$

где n — концентрация электронов, r — линейный размер области, занятой ионизованным газом, квазинейтральность выполняется с большой точностью.

Величину $r_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT_e}{n_e e^2}}$ называют *дебаевским радиусом* по

имени немецкого физика П. Дебая.

Согласно условию (1), если размеры области, занимаемой ионизованным газом с заданной концентрацией n_e и электронной температурой T_e , значительно превосходят r_D , то внутри этой области $n_e \approx n_i$. В этом случае при сильном отклонении n_e от n_i образующееся электрическое поле будет выталкивать частицы одного знака (присутствующие в избытке) и задерживать уход частиц другого знака. Такой механизм, автоматически поддерживающий равенство n_e и n_i , перестает действовать в случае, когда $r < r_D$. В областях с линейными размерами, значительно меньшими, чем r_D , электрические поля, возникающие при отклонении n_e от n_i , будут слишком малы для того, чтобы оказать заметное влияние на движение отдельных частиц.

Теперь можно вложить более определенный смысл в понятие «плазма». До тех пор, пока мы имеем дело с относительно небольшим числом заряженных частиц, которые не в состоянии создать достаточно сильное поле для того, чтобы оно могло существенно сказаться на поведении каждой из частиц, не имеет смысла говорить о наличии какого-то нового состояния вещества.

Новая форма вещества — плазма — соответствует такому состоянию, при котором число электронов и ионов настолько велико, что даже небольшое смещение электронной компоненты по отношению к ионной оказывается невозможным из-за сильных электрических полей, возникающих при нарушении равенства между n_e и n_i .

Таким образом, ионизованный газ можно назвать плазмой только в том случае, если условие (1) выполнено с достаточным запасом; квазинейтральность плазмы соблюдается только для достаточно больших объемов. Если выделить внутри плазмы куб, длина стороны которого x значительно меньше r_D , то внутри этого куба число ионов может значительно отличаться от числа электронов. Чем меньше отношение $\frac{x}{r_D}$, тем больше мо-

жет быть различие между значением отношения $\frac{n_e}{n_i}$ и единицей.

Вывести выражение для оценки дебаевского радиуса можно разными способами. Мы рассмотрим два возможных способа, а с другими способами можно будет познакомиться при раскрытии темы «Процессы в плазме» на основе учета возникновения плазменных колебаний.

Способ 1. Сделаем простой мысленный эксперимент. Пусть облачко ионизованного газа состоит из равного количества протонов и электронов с одинаковой температурой T и имеет форму параллелепипеда со сторонами a , b и d ($a \approx b \gg d$) (рис. 2.1).

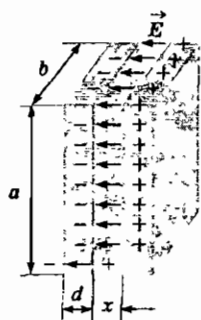


Рис. 2.1

Представим себе, что мы сдвинули все ионы относительно электронов на расстояние x вдоль стороны d ($x \approx d$). При этом на боковых гранях параллелепипеда образуются два слоя разноименных зарядов — как бы две обкладки плоского конденсатора с площадью пластин $S = ab$ и расстоянием между ними d . Емкость такого конденсатора

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d}.$$

Заряд q на каждой обкладке равен полному числу заряженных частиц одного знака в слое толщиной x , и если плотность электронов равна n , а заряд каждого электрона e , то $q = enSx$.

Соответственно, разность потенциалов между обкладками будет равна: $\Delta\varphi = U = \frac{q}{C} = \frac{nedx}{\epsilon_0}$.

Такой конденсатор обладает определенной энергией, заключенной в его электрическом поле: $W = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}$. Поэтому само-

произвольно, т. е. за счет движения частиц, такое разделение зарядов, которое мы мысленно осуществили, могло бы произойти только в том случае, если энергия электрического поля конденсатора не превышает полной энергии теплового движения всех частиц, заключенных в его объеме: $W \leq nSd kT$. Таким образом, закон сохранения энергии позволяет оценить возможный масштаб максимального самопроизвольного разделения зарядов:

$$x \leq \sqrt{\frac{2\epsilon_0 kT}{ne^2}}.$$

Более точный расчет дает: $x \leq r_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT}{ne^2}}$. На расстояниях

x , существенно больших дебаевского радиуса: $\left(x \gg r_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT}{ne^2}} \right)$,

значительное разделение зарядов в плазме невозможно, и ее можно считать квазинейтральной, т. е. суммарный заряд всех частиц в объемах, значительно больших r_D^3 , с высокой точностью равен нулю.

Если в плазму внести заряд извне, то его поле вызовет смещение плазменных частиц: частицы того же знака удалятся от данного заряда, а частицы с противоположным знаком заряда приблизятся. Произойдет то, что называют поляризацией. В результате поле внесенного заряда будет экранировано плазмой и исчезнет на расстояниях порядка дебаевского радиуса. Из-за поляризации потенциал отдельного заряда в плазме определяется не кулоновскими силами, а более сложным соотношением.

Совершенно очевидно, что в качестве пробного заряда можно рассматривать любой заряд самой плазмы: его поле экранируется в плазме на расстоянии дебаевского радиуса. Если же разделение зарядов в плазме все-таки произошло, то возникающее электрическое поле будет стремиться устранить его.

Способ 2. Предположим, что все электроны в слое плазмы толщиной l смещены на расстояние x . Модуль локальной на-

пряженности электрического поля равняется

$$E = \frac{enx}{\varepsilon_0}. \quad (2)$$

Увеличение потенциальной энергии ΔW электрона, прошедшего расстояние l в направлении этого поля, равно $\Delta W = eEx = \frac{e^2 nx^2}{\varepsilon_0}$. Если других сил, действующих на электрон,

нет, то он может увеличить свою потенциальную энергию только за счет уменьшения кинетической энергии, которая в среднем будет порядка kT . Считая $\Delta W \approx kT$ и определив *дебаевский радиус* r_D как

$$r_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 kT}{ne^2}}, \quad (3)$$

мы видим, что $x \approx r_D$.

Следовательно, дебаевский радиус представляет собой максимальное значение пространственного разделения зарядов, которое может достигаться при тепловом движении частиц.

Это можно показать нагляднее, если обратить внимание на то, что из соотношений (2) и (3) следует:

$$\lambda_D = vt, \quad (4)$$

где $v \approx \sqrt{\frac{kT}{m}}$ — приближенно равняется средней тепловой скорости электронов.

Другими словами, дебаевский радиус есть среднее расстояние, на которое может смещаться электрон за характерное время t , за которое плазма реагирует на нарушение нейтральности. Если t представляет собой характеристическую единицу времени для плазмы, то λ_D следует рассматривать как характеристическую единицу длины.

Дебаевский радиус равняется расстоянию, на котором плазма экранирует себя от локального избытка заряда.

Плазма как ансамбль частиц. Вернемся снова к понятию плазмы как четвертого состояния вещества и дадим еще одно определение плазмы. Сравним различные состояния вещества на микроскопическом уровне, попытавшись это сделать с помощью примитивной иллюстрации (рис. 2.2).

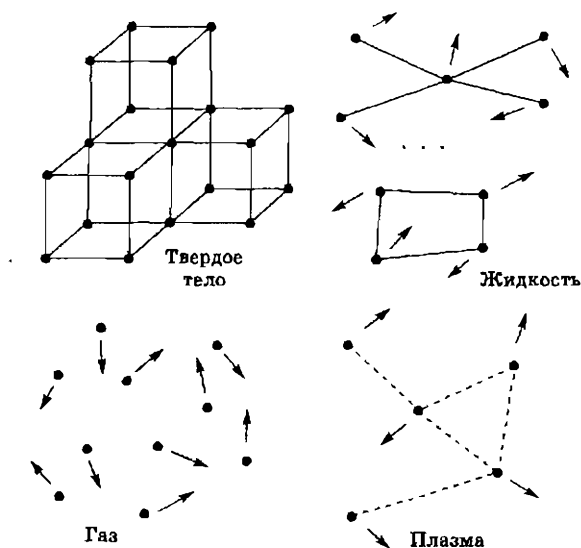


Рис. 2.2

В твердом кристаллическом теле атомы упорядочены и образуют решетку. Движение их весьма ограничено: допускаются лишь малые колебания в окрестности положений равновесия в узлах решетки. Колебания эти — фононы — отнюдь не индивидуальны. В них участвуют все частицы идеального кристалла. Поэтому можно сказать, что для кристаллической фазы на микроскопическом уровне характерна коллективная динамика.

Обратимся к жидкой фазе. Молекулы жидкости располагают гораздо большей свободой, чем молекулы твердого тела, — здесь уже имеет место броуновское движение, но оно еще не свободно. Молекулы достаточно эффективно взаимодействуют с ближайшими соседями, образуя некоторые короткоживущие ансамбли. Привычные представления о хаотичности движения молекул жидкости в какой-то мере правильны, но лишь постольку, поскольку подразумевается некоторое усреднение в пространстве и(или) во времени. В особенности это утверждение относится к микродинамике воды или других сильно полярных жидкостей, в которых сила взаимодействия молекул не слишком быстро падает с увеличением расстояния между ними:

$$F \sim \frac{1}{r^4}.$$

Ситуация решительным образом меняется при переходе к газу. В достаточно нагретом и разреженном газе, что как раз соответствует критерию идеальности газа, молекулы (или атомы) почти свободны. Единственное проявление какого-то взаимодействия молекул с макроскопической точки зрения — выравнивание основных параметров, например давления и температуры, по объему газа. Само взаимодействие частиц газа можно представить как более или менее частые соударения частиц. Такое представление обусловлено, во-первых, разреженностью газа и, во-вторых, достаточно быстрым падением эффективности взаимодействия молекул с расстоянием: $F \sim \frac{1}{r^7}$ (сила

Ван-дер-Ваальса). Чем более газ разрежен, тем реже столкновения, тем меньше и взаимное влияние частиц.

Казалось бы, поскольку горячая плазма еще более разрежена, чем газ, ее частицы должны быть «еще свободнее». Тем более, что, по крайней мере, электроны движутся очень быстро. Это можно видеть из выражения для характерной скорости теплового движения: $v \approx \sqrt{\frac{kT}{m}}$.

Принципиально важно то обстоятельство, что вследствие ионизации силы Ван-дер-Ваальса заменяются кулоновскими силами, которые очень медленно спадают при увеличении расстояния: $F \sim \frac{1}{r^2}$. Это приводит к возможности формирования больших ансамблей взаимодействующих частиц, которые при переходе к все более горячей и разреженной плазме ведут себя по законам гидродинамики и характеризуются коллективной динамикой.

Теперь можно вернуться к определению плазмы и дать более общее определение, так как термин «плазма» широко используется в современной физике. Этот термин применяют к ионизованному газу при таких условиях, когда силами взаимодействия составляющих его частиц нельзя пренебрегать. Плазмой называют и электронный газ в металлах и полупроводниках. Поэтому специалисты в различных областях физики плазмы определяют ее по-разному. Но если исходить из самых существенных признаков плазмы как четвертого состояния вещества, то можно дать такое универсальное определение:

Плазма есть неструктурированная квазинейтральная система, составленная из большого числа заряженных частиц и характеризующаяся коллективной динамикой.

В качестве домашнего задания следует предложить учащимся ознакомиться с содержанием § 9–13 учебного пособия и проанализировать решение задач 1–4.

Практикум по решению задач

Задача 1. Определите силу, действующую на электрон, и сообщаемое ему ускорение, при нарушении квазинейтральности в фотосфере Солнца, если характерный масштаб равен 10 мм.

Решение. Для оценки силы, действующей на электрон при нарушении квазинейтральности, воспользуемся определением напряженности:

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_{\text{эл}}}{q}, \text{ или } E = \frac{F_{\text{эл}}}{q} \text{ (здесь } q = e\text{)}.$$

Откуда

$$F = Ee. \quad (1)$$

Модуль напряженности электрического поля, возникающего при нарушении нейтральности плазмы фотосферы Солнца, определяется соотношением

$$E = \frac{en}{\epsilon_0} x, \quad (2)$$

где для нашего случая $x = 10$ мм.

Объединяя выражения (1) и (2), получим:

$$F = \frac{e^2 nx}{\epsilon_0}. \quad (3)$$

Движение частицы в электрическом поле можно описать классическим уравнением в форме второго закона Ньютона:

$$m\vec{a} = \vec{F}.$$

Учитывая соотношение (3), получим:

$$a = \frac{e^2 nx}{\epsilon_0 m_e}.$$

В таблице приложения 1 учебного пособия найдем, что концентрация частиц в фотосфере Солнца $n = 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

Произведем вычисления:

$$F = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 1 \cdot 10^{20} \cdot 10^{-2}}{8,85 \cdot 10^{-12}} = 2,9 \cdot 10^{-9} \text{ Н};$$

$$a = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 1 \cdot 10^{20} \cdot 1 \cdot 10^{-2}}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}} = 3,2 \cdot 10^{21} \text{ м/с}^2.$$

Задача 2. Вычислите время, в течение которого существуют области, нарушающие квазинейтральность плазмы солнечной короны.

Решение. Время, в течение которого существуют области, нарушающие квазинейтральность плазмы солнечной короны, можно найти, разделив значение дебаевского радиуса r_D на скорость более быстрых частиц (электронов):

$$t = \frac{r_D}{v_e}.$$

Дебаевский радиус экранирования равен:

$$r_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT}{n_e e^2}}.$$

Скорость, с которой движутся электроны, равна

$$v_e = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}}.$$

Произведя соответствующие подстановки, получим:

$$t = \sqrt{\frac{\epsilon_0 m_e}{3n_e e^2}}.$$

В таблице приложения 1 учебного пособия найдем, что концентрация частиц в солнечной короне $n = 10^{16} \text{ м}^{-3}$.

Произведем вычисления:

$$t = \sqrt{\frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{3 \cdot 1 \cdot 10^{16} \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}} = 10^{-10} \text{ с}.$$

Задача 3. Сравните потенциалы поля точечного заряда 1 мкКл, находящегося в вакууме и в плазме ионосферы слоя D, если расстояние до точки, в которой определяется потенциал, $r = 10 \text{ см}$.

Решение. В вакууме потенциал поля точечного заряда определяется формулой:

$$\varphi_k = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

В плазме любая частица (положительный ион или электрон) окружена преимущественно частицами, заряды которых противоположны по знаку заряду q частицы. Соответственно потенциал φ поля точечного заряда q в плазме убывает с расстоянием r значительно быстрее, чем в вакууме:

$$\varphi_D = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} e^{-\frac{r}{r_D}},$$

где дебаевский радиус определяется выражением $r_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT}{ne^2}}$.

Из таблицы приложения 1 учебного пособия выпишем значения концентрации частиц и температуры плазмы ионосферы Земли слоя D :

$$n = 10^8 \text{ м}^{-3}, T = 10^2 \text{ К.}$$

Произведем вычисления:

$$r = \sqrt{\frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 10^2}{1 \cdot 10^8 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}} = 6,9 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$\varphi_k = \frac{10^{-6}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,1} = 8,9 \cdot 10^4 \text{ В};$$

$$\varphi_D = \frac{10^{-6}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,1} e^{-\frac{0,1}{6,9 \cdot 10^{-2}}} = 2,1 \cdot 10^4 \text{ В.}$$

Сравнение полученных значений потенциалов позволяет сделать следующий вывод: потенциал поля точечного заряда q в плазме убывает с расстоянием r значительно быстрее, чем в вакууме.

Задача 4. Вычислите число N_D межзвездного пространства туманности Ориона. Концентрацию частиц и температуру межзвездного пространства считать соответственно равными $n = 10^{10} \text{ м}^{-3}$, $T = 10^4 \text{ К}$. Является ли межзвездное вещество плазмой?

Решение. Плазма должна удовлетворять следующим условиям:

1) $r_D \ll L$; 2) $N_D \gg 1$, где

$$r_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T}{n e^2}}, \quad N_D = 1,38 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{T^3}{n}}.$$

В нашем случае характерный размер плазмы L равен диаметру туманности: $D = 30$ св. лет $= 3 \cdot 10^{17}$ м.

Произведем вычисления:

$$r_D = \sqrt{\frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1 \cdot 10^4}{1 \cdot 10^{10} \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}} = 6,9 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$N_D = 1,38 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{(1 \cdot 10^4)^3}{1 \cdot 10^{10}}} = 6,4 \cdot 10^6.$$

Так как параметры межзвездного пространства туманности Ориона удовлетворяют условиям $r_D \ll L$ и $N_D \gg 1$, то его можно считать плазмой.

Задача 5. Вычислите дебаевский радиус экранирования для плазмы гелий-неонового лазера, если температура электронов $3 \cdot 10^4$ К, а ионов 400 К.

Решение. Для вычисления дебаевского радиуса экранирования для плазмы гелий-неонового лазера воспользуемся формулой:

$$r_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T_i}{n e^2 \left(1 + \frac{T_i}{T_e} \right)}}.$$

Произведем вычисления:

$$r_D = \sqrt{\frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 400}{10^{18} \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot \left(1 + \frac{400}{3 \cdot 10^4} \right)}} = \sqrt{\frac{488,5 \cdot 10^{-34}}{2,59 \cdot 10^{-20}}} = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

В качестве домашнего задания следует предложить учащимся решить задачи из учебного пособия (с. 68).

3. Методика изложения темы «Методы описания плазмы»

На изучение этой темы программой отводится 2 часа. Целесообразно подачу материала осуществить в форме лекции-беседы. Если состав группы не очень сильный, эту тему можно исключить вообще. Важный материал темы — понятие о вращении магнитного поля.

Приведем краткое изложение материала, который должен быть раскрыт в лекции-беседе.

Элементы магнитной гидродинамики

Наука о поведении плазмы, а также других проводящих жидкостей (например, жидких металлов) в магнитном поле называется *магнитной гидродинамикой* (при больших числах Маха — *магнитной газодинамикой*). Мы не будем подробно рассматривать эту новую, весьма интенсивно развивающуюся область науки. Остановимся лишь на некоторых основных понятиях.

Пусть некоторая область плазмы движется со скоростью $\vec{v}$ поперек линий индукции $\vec{B}$ магнитного поля. Тогда в этой области, как и в любом проводнике, наводится ЭДС индукции. Если характерный размер участка плазмы равен L , то ЭДС индукции равна $\mathcal{E} = vBL$. Сопротивление участка плазмы $R = \frac{\rho L}{S} = \frac{1}{\sigma L}$, где

σ — удельная проводимость плазмы: $\sigma = \frac{1}{\rho}$. По закону Ома сила тока, индуцированного в плазме, равна:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \sigma vBL^2. \quad (1)$$

Индукированный ток взаимодействует с магнитным полем так, что возникающая сила взаимодействия препятствует пере-

мещению плазмы (правило Ленца). Таким образом, кроме обычных гидродинамических сил, в плазме действуют еще и электромагнитные силы.

Точный учет этого взаимодействия связан с большими математическими трудностями. Однако оценить роль тех или иных сил можно с помощью некоторых безразмерных критериев, аналогичных числу Рейнольдса

Магнитное число Рейнольдса R_m характеризует отношение индукции магнитного поля индуцированных токов к индукции внешнего магнитного поля:

$$R_m = \frac{B_i}{B}. \quad (2)$$

Для оценки этой величины учтем, что $B_i \approx \frac{\mu_0 I}{L}$, где L — характерный размер участка плазмы, I — сила тока, определяемая выражением (1). С учетом этого получим $B_i = \sigma \mu_0 \nu B L$ и

$$R_m = \sigma \mu_0 \nu L. \quad (3)$$

Магнитные числа Рейнольдса выражаются большими числами, если велика удельная проводимость плазмы (малоудельное сопротивление) или значительны характерные размеры и скорости. Последнее наблюдается особенно часто в астрономических масштабах и имеет большое значение в астрофизике.

При больших магнитных числах Рейнольдса ($R_m \gg 1$) перемещение плазмы в магнитном поле должно приводить к возникновению очень сильного индуцированного магнитного поля, индукция которого во много раз превосходит индукцию внешнего магнитного поля. Это требует затраты энергии, которая может быть получена только за счет кинетической энергии плазмы. Следовательно, индуцированные токи, взаимодействуя с внешним магнитным полем, препятствуют перемещению плазмы поперек поля.

При $R_m \gg 1$ может оказаться, что плазма практически не может перемещаться относительно поля. В этом случае говорят, что *магнитное поле заморожено в плазму* — перемещение плазмы сопровождается соответствующим изменением магнитного поля, так что плазма не пересекает его линии индукции. Наоборот, если изменять внешнее магнитное поле, то при $R_m \gg 1$ плазма станет соответственно перемещаться, чтобы сохранилось условие *замороженности* магнитного поля.

Вмороженность магнитного поля

Эффект вмороженности магнитного поля рассмотрен в § 15 учебного пособия. Вмороженность магнитного поля в проводящую среду является следствием высокой электропроводности плазмы. Даже холодная плазма поверхности Солнца ($0,5 \text{ эВ}^*$) по электропроводности приближается к металлам. При термоядерной температуре 10 кэВ удельная проводимость водородной плазмы в 20 раз больше удельной проводимости меди.

При изменении магнитного потока через произвольный замкнутый контур возникает ЭДС индукции. При бесконечной проводимости любая ненулевая ЭДС индукции привела бы к бесконечной силе тока в контуре. Следовательно, в случае очень высокой проводимости линии индукции магнитного поля должны быть как бы «приклеены» к веществу, чтобы магнитный поток через любой контур оставался постоянным.

Поскольку проводимость реальной плазмы все же конечна, то и утверждение о вмороженности не абсолютно. Магнитное поле и ток перестраиваются при перемещении или деформации проводника либо при изменении условий на его границе. Приближение к идеальной проводимости означает, что за характерное время процесса такая перестройка незначительна. Известно, например, что ток достаточно высокой частоты способен течь лишь в тонком слое вблизи поверхности проводника (скин-эффект). При этом в глубину проводящей среды ток и поле просто не успевают проникнуть.

Прямое следствие вмороженности магнитного поля в плазму — гигантские поля нейтронных звезд (пульсаров). Они генерируются в процессе гравитационного коллапса звезды. Как именно это происходит, показано на рис. 3.1 (в левой части рисунка — начальное состояние звезды; в правой части — конечное состояние — нейтронная звезда).

Представим себе некоторое плазменное образование с нулевым (или достаточно слабым) магнитным полем в объеме плазмы и ненулевым (соответственно большим по значению магнитной индукции) — вне его. Предположим, что внешнее поле в плазму проникнуть не успело. Тогда в некотором приповерх-

* В атомной и ядерной физике температуру часто выражают в энергетических единицах — электронвольтах: 1 эВ соответствует температуре 7700 К ($T = \frac{2}{3} \frac{W}{k}$).

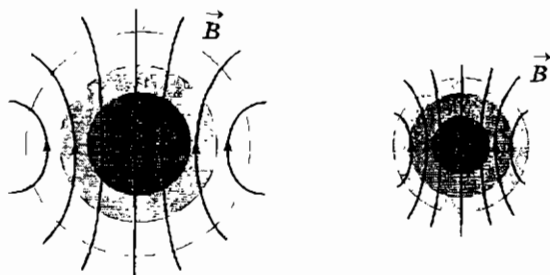


Рис. 3.1

ностном слое плазмы обязан протекать ток, обеспечивающий скачок магнитного поля. Эта ситуация — в упрощенной двумерной модели — изображена на рис. 3.2 (магнитное удержание).

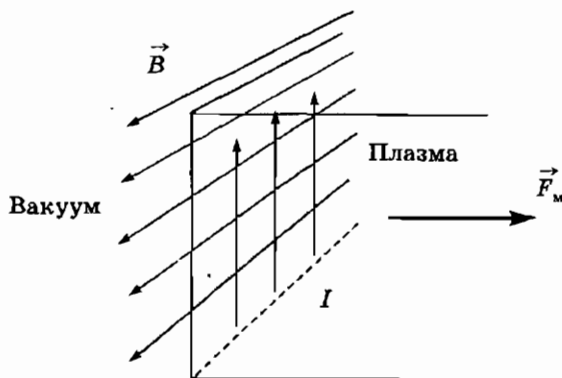


Рис. 3.2

Мы видим, что в результате взаимодействия поля и тока на границу плазмы будет действовать сила, направленная вглубь, оказывая «магнитное давление» («правило левой руки»). На этом базируется метод магнитного удержания плазмы. Дело в том, что горячую плазму нельзя непосредственно заключить в твердый сосуд — ее погубит рекомбинация на стенках. В то же время как-то удерживать ее необходимо. Из нашего рассмотрения следует, что в принципе плазму можно удерживать «магнитной стенкой» (и, соответственно, толкать «магнитным поршнем»). Одна из простейших магнитных ловушек (ее называют пробкотроном или зеркальной ловушкой) схематически представлена на рис. 3.3.

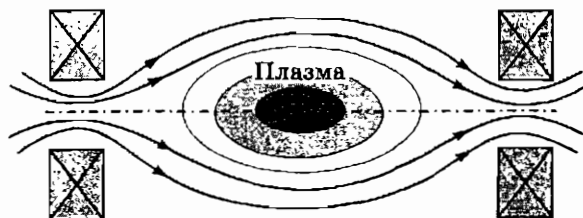


Рис. 3.3

На этом несложном примере мы имели возможность убедиться в том, что у плазмы электродинамические и механические свойства связаны друг с другом. Движение и равновесие плазмы определяются электромагнитными полями; в свою очередь, течение плазмы порождает электромагнитные поля и токи.

В большинстве случаев макроскопическая динамика плазмы тождественна так называемой магнитной гидродинамике, которая, в частности, описывает равновесие и течение жидких металлов. Таким образом, можно сделать следующий вывод: хотя плазма на температурной шкале располагается выше газа (а в типичных экспериментальных условиях она и более разрежена, чем газы при атмосферном давлении), она по своим макроскопическим свойствам в большей степени напоминает конденсированное вещество и заметным образом отличается от газов, что используется для сжатия и разогрева плазмы с помощью быстро нарастающего магнитного поля.

Сжатие плазмы можно проиллюстрировать с помощью простого опыта.

На двухэлектродную трубку надевается 8 катушек с внутренним диаметром, равным диаметру трубки. Каждая катушка содержит 350 витков медного провода, площадь сечения которого $0,38 \text{ мм}^2$; расстояние между катушками 3 см. Катушки объединяются в две последовательно включенные между собой группы, каждая из которых состоит из четырех параллельно соединенных катушек. На их зажимы подается от школьного распределительного щита кратковременный импульс выпрямленного тока ($I = 10 \text{ А}$) в тот момент, когда в двухэлектродной трубке будет создано достаточно высокое разрежение и она начнет светиться голубовато-сиреневым цветом. При этом наблюдается эффектный отрыв плазмы от стенок трубки и образование вдоль ее оси голубого узкого плазменного шнура. При выключении тока узкий шнур сразу исчезает.

Опыт можно осуществить и при подаче на катушки переменного напряжения от сети, однако его результаты будут не так наглядны. В этом случае можно воспользоваться трубкой с бледно-голубым свечением из набора трубок различного разреза.

Сжатие и удержание плазмы

Одна из важнейших задач, которую можно решить с помощью плазмы, это осуществление управляемого термоядерного синтеза. Термоядерные реакции могут начаться при температурах, не меньших ста миллионов кельвин. Ясно, что возникающую при этом высокотемпературную плазму нельзя удержать ни в одном сосуде. Плазма либо прожжет стенку, либо отдаст ей энергию и охладится. Удержание плазмы, в принципе, возможно лишь с помощью магнитного поля. В самом деле, если магнитное давление $p = \frac{B^2}{2\mu_0}$ окажется больше давления газа

$p = nkT$, то магнитное поле удержит плазму. Таким образом, условие удержания: $\frac{B^2}{2\mu_0} \geq nkT$.

Отсюда для индукции удерживающего магнитного поля получается: $B \geq \sqrt{2\mu_0 nkT}$, где $n \approx 10^{22} \text{ м}^{-3}$ — концентрация частиц в термоядерной плазме.

Создать такое стационарное поле пока не удастся, но в импульсе достигаются и более сильные поля. Сжимающее магнитное поле можно получить либо за счет внутренних токов в самой плазме, либо за счет внешнего магнитного поля, возникающего при протекании тока в проводах. В качестве примера рассмотрим идею одного эксперимента (рис. 3.4).

Источник питания 2 с помощью разрядного устройства 3 вызывает искру в разрядном промежутке 4, вследствие чего виток 5 подключается к конденсаторной

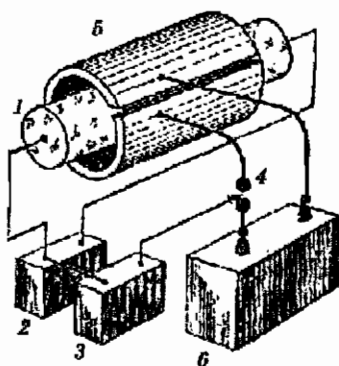


Рис. 3.4

батареи 6. При разряде конденсаторов в витке возникают огромные токи ($I \approx 10^6$ А). Вследствие этого внутри витка создается практически однородное магнитное поле, линии индукции которого направлены вдоль трубки (продольное поле). Индукцию этого поля можно оценить с помощью выражения $B \approx \frac{\mu_0 I}{2r}$.

Полагая $r \approx 0,1$ м, $I = 10^6$ А, получим $B = 6$ Тл.

Быстро нарастающее магнитное поле сжимает плазму в очень узкий шнур. Процесс сжатия плазмы идет настолько быстро, что возникающая при этом ударная волна разогревает плазму свыше 10^6 К.

Одним из недостатков рассмотренной установки является утечка плазмы в торцы трубки 1. Борьба с утечкой плазмы через торцы можно следующим образом:

- изготовить трубку в виде замкнутого кольца — *тороида*, у которого нет торцов. Такие установки созданы в ряде стран;
- использовать *магнитные пробки* (так называются созданные на концах трубки участки с повышенной индукцией магнитного поля). Ионы и электроны, из которых состоит плазма, движутся в магнитном поле по винтовым линиям, навивающимся на линии индукции. Вблизи магнитной пробки скорость продольного движения уменьшается, а скорость вращения нарастает, и ион, отразившись от магнитной пробки, возвращается опять в центральную часть камеры.

Основным недостатком всех существующих установок является малое время удержания горячей плазмы. Причина заключается в наличии целого ряда *неустойчивостей* плазмы, вследствие чего плазменный шнур начинает колебаться и изгибаться. Коснувшись стенок, плазма отдает им часть энергии и охлаждается. Кроме того, часть плазмы всегда «утекает» через магнитные пробки.

В настоящее время в ряде крупнейших лабораторий мира интенсивно исследуются различные методы стабилизации высокотемпературной плазмы. Достигнуты довольно крупные успехи. Однако до сих пор не удалось получить плазму с достаточно высокой температурой, концентрацией и временем удержания плазмы.

Квантовые явления в плазме

Рассмотрим свойства плазмы на примере водородной плазмы, с которой связываются надежды на осуществление управляемого термоядерного синтеза (УТС). Эта плазма полностью ионизована, ее в принципе можно изолировать от стенок с помощью магнитных полей.

Оценим высоту электростатического потенциального барьера отталкивания, возникающего между двумя протонами при их тесном сближении: $U_{pp} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$.

Полагая минимальное расстояние сближения ядер $r \approx 10^{-14}$ м, получим необходимую температуру водородной плазмы: $T \approx \frac{U_{pp}}{k} \approx 10^9$ К.

Эксперимент, однако, показывает, что реакция ядерного синтеза ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n$ идет уже при температуре 10^7 К. Следовательно, ядра преодолевают энергетический барьер, имея в 100 раз меньшую энергию движения. Описанное явление, называемое туннельным эффектом, объясняется в квантовой механике.

Но поскольку вероятность туннельного эффекта $\approx 10^{-5}$, то высокотемпературная водородная плазма подчиняется законам классической статистики и для расчета характерной скорости теплового движения протонов в плазме можно воспользоваться формулой для средней квадратичной скорости молекул идеального газа: $v = \sqrt{\frac{3kT}{m_p}}$.

При температуре $T = 10^7$ К характерная скорость $v = 5 \cdot 10^5$ м/с.

Рассчитаем концентрацию частиц в плазме, при которой ее можно было бы считать идеальным газом. Ясно, что это возможно в случае, когда плазма настолько разрежена, что энергия кулоновского взаимодействия между ее частицами мала по сравнению с их кинетической энергией:

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} < kT. \quad (1)$$

Учтем также, что среднее расстояние между частицами плазмы $r \sim \frac{1}{\sqrt[3]{n}}$, где n — концентрация частиц. Из полученных выражений следует, что

$$n < \left(\frac{kT \cdot 4\pi\epsilon_0}{e^2} \right)^3. \quad (2)$$

Для рассматриваемой водородной плазмы $n \approx 10^{19} \text{ м}^{-3}$, а правая часть неравенства (2) имеет порядок 10^{30} , т. е. неравенство (2) удовлетворяется с большим избытком.

В качестве домашнего задания следует предложить учащимся ознакомиться с содержанием § 14–15 и § 16–17 (желающим) учебного пособия.

Практикум по решению задач

Задача. В пространстве между двумя плоскими параллельными электродами зажигается электрический разряд (так называемый «Z-пинч») и образуется сжимаемый силами магнитного давления плазменный шнур радиусом $r_0 = 0,01 \text{ м}$ с концентрацией электронов и ионов $n = 10^{19} \text{ м}^{-3}$, сила тока разряда $I = 10^6 \text{ А}$. Оцените температуру плазмы.

Решение. Температуру образовавшегося плазменного шнура можно найти по формуле

$$T = \frac{\mu_0 I^2}{16\pi^2 n k r_0^2}.$$

Произведем вычисления:

$$T = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10^6}{16 \cdot 3,14^2 \cdot 1 \cdot 10^{19} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 0,01^2} = 5,7 \cdot 10^5 \text{ К}.$$

4. Методика изложения темы «Процессы в плазме»

На изучение этой темы следует отвести 2 занятия (4 часа).

Предпочтительная форма проведения занятий — семинар с раскрытием основных идей темы и практикум по решению задач.

Семинар «Идеальная плазма»

Приведем краткое изложение материала, который должен быть раскрыт на семинаре.

Колебания в плазме

Оценим размеры области и промежутки времени, для которых выполняется условие квазинейтральности плазмы. Представим себе, что в плоском слое однородной нейтральной в целом плазмы все электроны сместились на малое расстояние x в одном и том же направлении. Возникающее в результате такого смещения электронов результирующее распределение зарядов будет таким же, как в плоском конденсаторе. Электрическое поле в плазме определяется плотностью заряда на «обкладках» такого «конденсатора». При смещении электронов в слое толщиной d (рис. 4.1) нарушение нейтральности происходит только в тонких областях толщиной x вблизи границ слоя: с одной стороны образуется избыток положительного заряда, с другой — отрицательного.

Если концентрацию электронов в нейтральной плазме обозначить через n , то при смещении всех электронов в слое на расстояние x поверхностная плотность заряда σ на «обкладке» будет равна nex . Поэтому напряженность поля $\vec{E}$ в конденсаторе (точнее, ее проекция на ось X) будет равна:

$$E_x = -\frac{\sigma}{\epsilon_0} = -\frac{nex}{\epsilon_0}. \quad (1)$$

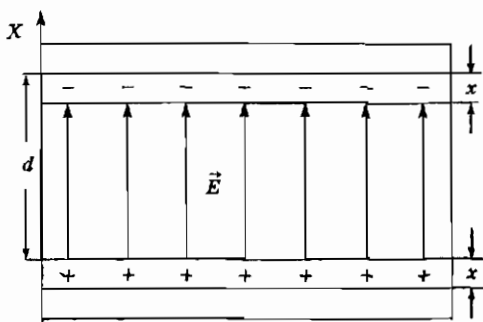


Рис. 4.1

Сила, действующая на каждый электрон слоя, пропорциональна смещению электрона x и, как видно из рис.4.1, направлена в сторону, противоположную смещению:

$$F_x = eE_x = -\frac{ne^2 x}{\epsilon_0}. \quad (2)$$

Эта сила сообщает каждому электрону ускорение: $x'' = -\frac{e^2 n}{m\epsilon_0} x$. Решением этого дифференциального уравнения

является выражение: $x = x_m \cos \omega t$, где $\omega = \omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n}{m\epsilon_0}}$. Поэтому электроны в плазме будут совершать гармонические колебания с плазменной частотой ω_p :

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_0 m}}. \quad (3)$$

Частота ω_p — одна из важнейших характеристик плазмы. Ее называют *плазменной частотой*, а сами колебания *плазменными* или *ленгмюровскими*, по имени американского физика И. Ленгмюра, впервые исследовавшего эти колебания.

Таким образом, в результате разделения зарядов в плазме возникают электрические поля, вызывающие колебания частиц. Эти колебания стремятся восстановить квазинейтральность плазмы. Ясно, что заметить отклонение плазмы от квазинейтральности можно только на протяжении времени, ма-

лого по сравнению с периодом плазменных колебаний. В среднем (за много периодов колебаний) плазма ведет себя как квазинейтральная среда. Период плазменных колебаний $T_p = \frac{2\pi}{\omega_p}$ —

это характерный временной масштаб разделения зарядов в плазме.

Экранировка кулоновского взаимодействия. Теперь оценим пространственный масштаб разделения в плазме зарядов. Чем может быть вызвано самопроизвольное разделение зарядов? Очевидно, их хаотическим тепловым движением. Характерная скорость v теплового движения электронов имеет порядок $\sqrt{\frac{kT}{m}}$. Пространственный масштаб разделения зарядов опре-

деляется произведением характерной скорости на время движения в одном направлении.

В отличие от газа, состоящего из нейтральных частиц, для которого это время равно времени свободного движения электрона между столкновениями с атомами или молекулами, в плазме характерное время свободного движения электрона определяется периодом T_p плазменных колебаний:

$$T_p = \frac{2\pi}{\omega_p}.$$

Действительно, при пространственном разделении зарядов возникают плазменные колебания, которые стремятся восстановить электронейтральность. При колебаниях скорость электрона за половину периода изменяет свое направление на противоположное.

Таким образом, для оценки размера r области пространственного разделения зарядов нужно характерную скорость $v \approx \sqrt{\frac{kT}{m}}$ умножить на время движения, которое по порядку ве-

личины есть $\frac{1}{\omega_p}$: $r \approx v \frac{1}{\omega_p} \approx \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT}{ne^2}}$.

Эта величина обозначается r_D и называется *дебаевским радиусом экранирования*:

$$r_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT}{ne^2}}. \quad (4)$$

Дебаевский радиус есть среднее расстояние, на которое может сместиться электрон за время $\frac{1}{\omega_p}$, т. е. за характерное время, за которое плазма реагирует на нарушение нейтральности.

Если величина $\frac{1}{\omega_p}$ представляет собой характеристическую единицу времени для плазмы, то величину r_D следует рассматривать как характеристическую единицу длины.

Дебаевский радиус равен расстоянию, на котором плазма экранирует себя от локального избытка заряда.

Пространственные масштабы в плазме. Чтобы плазма сохраняла квазинейтральность, линейный размер L занимаемой ею области должен намного превосходить дебаевский радиус r_D : $r_D \ll L$. Только при выполнении условия квазинейтральности плазма проявляет коллективные свойства, а не ведет себя как простая совокупность заряженных частиц.

Из рассмотренной выше физической картины экранирования кулоновского взаимодействия следует, что дебаевский радиус экранирования должен намного превосходить среднее расстояние $\bar{r}$ между заряженными частицами: $\bar{r} \ll r_D$.

Итак, чтобы электронейтральная в целом система электронов и ионов могла рассматриваться как плазма, необходимо выполнение условий:

$$\text{и} \quad \left. \begin{array}{l} \bar{r} \ll r_D \\ r_D \ll L. \end{array} \right\} \quad (5)$$

Первому из условий (5) можно придать несколько иной вид. Так как среднее расстояние $\bar{r}$ определяется концентрацией n электронов: $\bar{r} \sim n^{-1/3}$, то с помощью выражения (4) условие $r_D \gg \bar{r}$ можно записать следующим образом:

$$\frac{e^{2/3} \sqrt[3]{n}}{\epsilon_0 kT} \ll 1. \quad (6)$$

Из этого выражения видно, что в плазме средняя энергия кулоновского взаимодействия частиц много меньше энергии их теплового движения.

Плазма в магнитном поле

Наиболее интересные свойства плазмы проявляются только тогда, когда она сильно взаимодействует с внешним магнитным полем.

Эти явления наиболее удобно рассматривать в рамках предположения, что плазма представляет собой сплошную среду (магнитная гидродинамика). Мы выясним, как ведет себя плазма, изучая движение отдельной заряженной частицы плазмы в магнитном поле. При высоких температурах или низких плотностях плазмы средняя длина свободного пробега становится очень большой. В этом случае взаимодействия между частицами относительно незначительны и ими можно пренебречь по сравнению с взаимодействием этих частиц с внешним магнитным полем. Следовательно, плазму можно будет рассматривать как совокупность заряженных частиц, которые движутся почти независимо друг от друга во внешнем магнитном поле и удовлетворяют только макроскопическому условию нейтральности.

Модуль силы, которая действует на положительно заряженную частицу, движущуюся со скоростью $\vec{v}$ в магнитном поле, равен: $F_{\perp} = qvB \sin \alpha$, где q — заряд частицы, B — модуль индукции магнитного поля, α — угол между векторами $\vec{v}$ и $\vec{B}$.

Если $\alpha = 0$, то $F_{\perp} = 0$ и движение вдоль линии индукции магнитного поля не зависит от этого поля (рис. 4.2, а). Если скорость $\vec{v}$ перпендикулярна вектору $\vec{B}$, то сила направлена так, как показано на рис. 4.2, б. Так как сила $\vec{F}_{\perp}$ в этом случае перпендикулярна скорости $\vec{v}$, то магнитное поле не совершает никакой работы, и поэтому кинетическая энергия и модуль скорости $\vec{v}$ частицы остаются постоянными. Нерелятивистское ускорение $\vec{a}$ будет перпендикулярно скорости $\vec{v}$, а его модуль равен:

$$a = \frac{F_{\perp}}{m} = \frac{qvB}{m}.$$

Частица будет совершать равномерное движение по окружности радиусом R : $R = \frac{v^2}{a} = \frac{mv}{qB}$. Этот радиус обычно называется *ларморовским радиусом*, и для частицы, движущейся с харак-

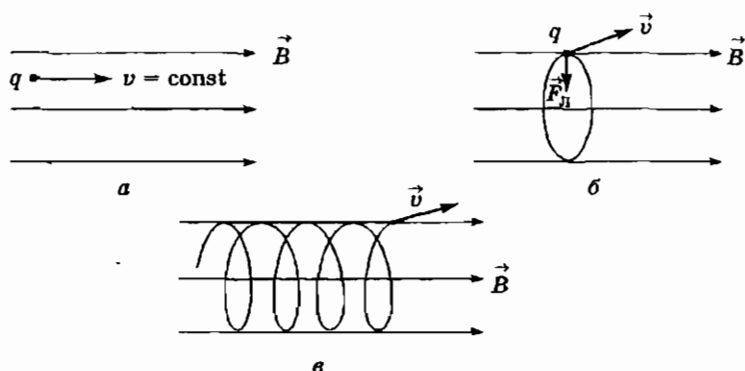


Рис. 4.2

терной скоростью $v \approx \sqrt{\frac{kT}{m}}$, он равен

$$R = \frac{\sqrt{mkT}}{qB}. \quad (7)$$

Циклическая частота ω_c движения по окружности называемая *ларморовской* (или *циклотронной*) частотой, равна:

$$\omega_c = \frac{v}{R} = \frac{qB}{m}. \quad (8)$$

В отличие от ларморовского радиуса ларморовская частота не зависит от скорости частицы и поэтому будет одной и той же для всех частиц одного и того же сорта.

Отметим, что из выражения (8) следует, что ларморовская частота для электронов в $\frac{m_i}{m_e}$ раз больше, чем для ионов, т. е. в тысячи раз больше, в то время как уравнение (7) показывает, что в среднем ларморовский радиус иона больше, чем ларморовский радиус электрона, в $\sqrt{\frac{m_i}{m_e}}$ раз. Отметим также, что ларморовская частота для электронов будет приблизительно равна

$\omega_c = \frac{v}{R} \approx \frac{\sqrt{kT}}{\sqrt{m_e}} \cdot \frac{1}{R}$, а, как следует из уравнения (3), плазменная час-

тока в том же приближении равна

$$\omega_p = \frac{\sqrt{\frac{kT}{m_e}}}{r_D}, \quad (9)$$

так что мы получаем следующее простое соотношение между четырьмя основными плазменными параметрами:

$$\frac{\omega_c}{\omega_p} \approx \frac{r_D}{R}. \quad (10)$$

Если частица движется со скоростью, направленной под углом α к вектору магнитной индукции $\vec{B}$, то траекторией ее движения является спираль, ось которой совпадает с направлением линий индукции магнитного поля, как и показано на рис. 4.2, в.

Мы видим, что в своем движении частицы придерживаются направления линий индукции магнитного поля до тех пор, пока они не столкнутся с другими частицами или со стенками. Если средняя длина свободного пробега велика, как это имеет место в плазме при высокой температуре и (или!) при низкой плотности, то диффузия поперек линий индукции магнитного поля будет медленной.

Если к тому же ларморовский радиус мал по сравнению с размерами области, занимаемой плазмой, то столкновения со стенками или с другими чужеродными объектами не будут играть значительной роли и *плазма будет вынуждена двигаться вдоль направления линий индукции магнитного поля.*

В интересной для астрономии плазме огромных объемов радиус R всегда мал по сравнению с размерами плазмы. Это относится и ко многим видам плазмы, получаемой в лабораторных условиях.

Способность магнитного поля направлять движение плазмы может быть проиллюстрирована многими примерами. Одним из примеров является *солнечный протуберанец* (рис. 4.3), который представляет собой плазму, извергаемую с поверхности Солнца. На рис. 4.4 схематично показано, как плазма протуберанца движется по длинным дугам вдоль линий индукции магнитного поля над поверхностью Солнца. Способность магнитного поля ограничивать размеры плазмы может найти применение в установках для термоядерных реакций.



Рис. 4.3

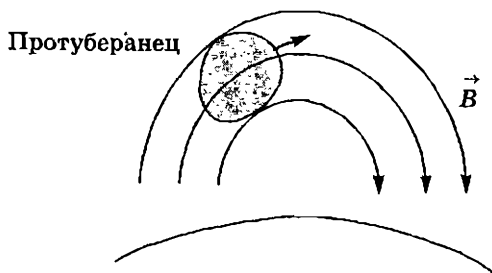


Рис. 4.4

Волны в плазме

Выведенная из состояния термодинамического равновесия плазма стремится наиболее быстрым путем вернуться к равновесному состоянию. В отличие от газа, состоящего из нейтральных частиц, где такой процесс релаксации определяется исключительно передачей энергии при столкновениях частиц, плазма возвращается в равновесное состояние преимущественно путем возбуждения колебаний и волн. Это так называемые плазменные неустойчивости, которые оказались основной преградой на пути осуществления управляемой термоядерной реакции.

Плазменные колебания — это электрические продольные колебания, в которых магнитное поле практически отсутствует, а вектор напряженности электрического поля направлен вдоль движения частиц.

Кроме таких продольных колебаний, в плазме, как и в других материальных средах, возможно распространение обычных поперечных электромагнитных волн. Для них плазменная час-

тота ω_p представляет собой граничную частоту. Электромагнитные волны с частотой меньше ω_p не могут проникать в плазму, так как их низкочастотное электрическое поле экранируется свободными электронами плазмы. Падающая на границу плазмы волна при $\omega < \omega_p$ отражается от границы. Если же частота электромагнитной волны выше плазменной частоты, то такая волна проникает в плазму.

Ионосфера Земли является плазменным образованием; она сложна по составу, причина ее ионизации — ультрафиолетовое солнечное излучение, а также потоки быстрых заряженных частиц, идущие от Солнца. Радиосигналы с частотной модуляцией и сигналы телевидения, имеющие более высокую частоту, проходят ионосферу насквозь, поэтому для их хорошего приема необходимо находиться в «пределах видимости» передающей антенны. Так как ω_p пропорциональна квадратному корню от показателя преломления ($\sqrt{n}$), то ясно, что любое изменение n , например, изменение n от дня к ночи, а также изменение n , вызванное вспышками на Солнце, должно сильно влиять на качество приема радиопередач.

Для ионосферной плазмы граница прозрачности попадает в диапазон метровых радиоволн, поэтому радиосвязь с объектами в космосе возможна только в диапазоне метровых и дециметровых волн. Явление отражения волн длиной в несколько десятков метров от ионосферы используется для земной радиосвязи на большие расстояния, в частности, для распространения радиосигналов с амплитудной модуляцией — они отражаются от ионосферы (рис. 4.5).

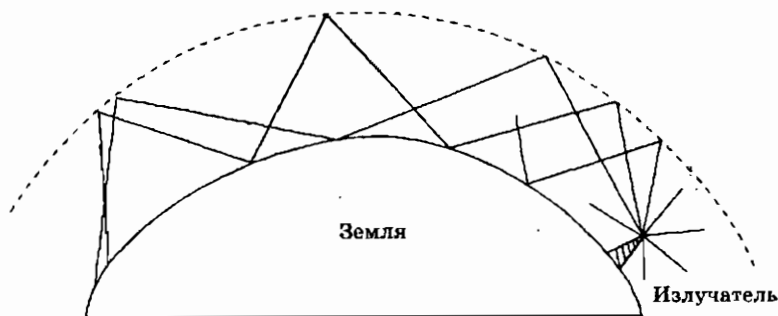


Рис. 4.5

Оценим диапазон области длин радиоволн, которые будут отражаться от ионосферы.

Максимальная концентрация электронов в ионосфере, согласно ракетным зондовым измерениям, равна 10^{12} м^{-3} . Эти данные позволяют вычислить собственные частоты плазменных колебаний в ионосфере: $\omega_p = 6 \cdot 10^{-7} \text{ рад/с}$. Найдем длину электромагнитных волн, частота которых совпадает с плазменной частотой в ионосфере. Для этого воспользуемся формулой $\lambda = 2\pi \frac{c}{\omega_p}$; получается, что $\lambda \approx 30 \text{ м}$. Следовательно, радиоволны

с $\lambda > 30 \text{ м}$ будут отражаться от ионосферы, как от металлического зеркала; для связи же со спутниками и орбитальными станциями нужны радиоволны с длинами волн, значительно меньшими 30 м.

Таким образом, общие закономерности распространения электромагнитных волн в металлах, плазме, ионосфере Земли, атмосфере звезд одни и те же, различие состоит в конкретных значениях n_e и соответственно ω_p .

Практикум по решению задач

Задача 1. Покажите с помощью вычислений, является ли идеальной плазма ионосферы Земли, плазма солнечного ветра, плазма протуберанца Солнца.

Решение. Плазма называется *идеальной* или газовой, если потенциальная энергия кулоновского взаимодействия двух частиц плазмы, находящихся на среднем расстоянии $\bar{r} = n^{-1/3}$ (n — концентрация частиц), мала по сравнению со средней кинетической энергией их теплового движения:

$$W_p \ll \bar{E}_k.$$

Это условие выполняется, если в плазме достаточно велико дебаевское число N_D — число частиц одного знака заряда, находящихся внутри сферы радиусом r_D :

$$N_D \gg 1, \text{ где } N_D = 1,38 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{T^3}{n}}.$$

Из таблицы приложения 1 учебного пособия выпишем значения концентрации и температуры ионосферы Земли, солнечного ветра, протуберанца Солнца.

Ионосфера Земли: $n = 10^{12} \text{ м}^{-3}$, $T = 1 \cdot 10^3 \text{ К}$;
 солнечный ветер: $n = 10^6 \text{ м}^{-3}$, $T = 1 \cdot 10^7 \text{ К}$;
 протуберанец Солнца: $n = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, $T = 1 \cdot 10^4 \text{ К}$.
 Произведем вычисления.

$$\text{Ионосфера Земли: } N_{D1} = 1,38 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{(1 \cdot 10^3)^3}{1 \cdot 10^{12}}} = 4,4 \cdot 10^4;$$

$$\text{солнечный ветер: } N_{D2} = 1,38 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{(1 \cdot 10^7)^3}{1 \cdot 10^6}} = 4,6 \cdot 10^{13};$$

протуберанец Солнца:

$$N_{D3} = 1,38 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{(1 \cdot 10^4)^3}{1 \cdot 10^{18}}} = 1,4 \cdot 10^3.$$

Так как для всех рассмотренных объектов $N_D \gg 1$, то плазму этих объектов можно считать идеальной.

Задача 2. Идеальна ли плазма солнечного ядра? Проведите расчет.

Решение. Условие идеальности плазмы $W_p \ll E_k$ выполняется, если в плазме достаточно велико дебаевское число N_D — число частиц одного знака заряда, находящихся внутри сферы радиусом r_D :

$$N_D \gg 1, \text{ где } N_D = 1,38 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{T^3}{n}}.$$

Из таблицы приложения 1 учебного пособия выпишем значения концентрации и температуры солнечного ядра.

Солнечное ядро: $n = 10^{32} \text{ м}^{-3}$, $T = 1 \cdot 10^7 \text{ К}$.

Произведем вычисления:

$$N_D = 1,38 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{(1 \cdot 10^7)^3}{1 \cdot 10^{32}}} = 4,4.$$

Строго условие идеальности плазмы ($N_D \gg 1$) не выполняется, поэтому плазму солнечного ядра считают неидеальной.

Задача 3. Вычислите ленгмюровскую частоту для слоев D, E, F_1 , F_2 ионосферы Земли.

Решение. Электроны плазмы совершают свободные гармонические колебания с циклической частотой $\omega = e \sqrt{\frac{n_e}{m_e \epsilon_0}}$, которая и является ленгмюровской частотой.

Из таблицы приложения 1 учебного пособия выпишем значения концентрации соответствующих слоев ионосферы Земли.

Ионосфера, слой D : $n_1 = 10^8 \text{ м}^{-3}$;

ионосфера, слой E : $n_2 = 10^{10} \text{ м}^{-3}$;

ионосфера, слой F_1 : $n_3 = 10^{11} \text{ м}^{-3}$;

ионосфера, слой F_2 : $n_4 = 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Произведем вычисления.

Ионосфера, слой D :

$$\omega_1 = 1,6 \cdot 10^{-19} \sqrt{\frac{1 \cdot 10^8}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}} = 5,6 \cdot 10^5 \text{ рад/с};$$

ионосфера, слой E :

$$\omega_2 = 1,6 \cdot 10^{-19} \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{10}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}} = 5,6 \cdot 10^6 \text{ рад/с};$$

ионосфера, слой F_1 :

$$\omega_3 = 1,6 \cdot 10^{-19} \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{11}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}} = 1,8 \cdot 10^7 \text{ рад/с};$$

ионосфера, слой F_2 :

$$\omega_4 = 1,6 \cdot 10^{-19} \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{12}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}} = 5,6 \cdot 10^7 \text{ рад/с}.$$

Задача 4. Проверьте, пройдет ли электромагнитная волна с частотой 1 МГц через атмосферу Солнца.

Решение. Атмосфера Солнца состоит из следующих слоев: фотосферы, хромосферы и короны.

Плазма Солнца отражает радиоволны, если их циклическая частота меньше или сравнима с циклической частотой ω_{0e} , определяемой соотношением: $\omega_{0e} = e \sqrt{\frac{n_e}{m_e \epsilon_0}}$, т. е. если выполняется

соотношение: $\omega_b < \omega_{0e}$ или $v_b < v_{0e}$.

Связь циклической частоты и частоты определяется выражением: $v = \frac{\omega}{2\pi}$.

Произведя соответствующие подстановки, получим:

$$v_{0e} = \frac{e}{2\pi} \sqrt{\frac{n_e}{m_e \epsilon_0}}.$$

Из таблицы приложения 1 учебного пособия выпишем значения концентрации соответствующих слоев атмосферы Солнца.

Корона: $n_1 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$;
хромосфера: $n_2 = 10^{18} \text{ м}^{-3}$;
фотосфера: $n_3 = 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

Произведем вычисления.

Корона:

$$v_{0e} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{16}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}} = 9 \cdot 10^8 \text{ Гц};$$

хромосфера:

$$v_{0e} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{18}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}} = 9 \cdot 10^9 \text{ Гц};$$

фотосфера:

$$v_{0e} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{20}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}} = 9 \cdot 10^{10} \text{ Гц}.$$

Сравнение полученных частот показывает, что соотношение $v_{\text{н}} < v_{0e}$ выполняется для всех слоев атмосферы Солнца. Следовательно, волна с частотой 1 МГц пройдет через атмосферу Солнца.

Задача 5. Определите фазовую скорость электромагнитных волн в плазме облака межзвездного газа (ионизированный водород) при отсутствии магнитного поля для частот: а) $3 \cdot 10^3$ Гц — низкочастотные волны, б) $3 \cdot 10^5$ Гц — длинные радиоволны, в) $3 \cdot 10^{13}$ Гц — инфракрасное излучение.

Решение. Рассмотрим распространение электромагнитных волн в плазме облака межзвездного газа (ионизированный водород) при отсутствии внешнего магнитного поля ($B_0 = 0$). Данная волна является поперечной, поэтому для вычисления фазовой

скорости воспользуемся формулой: $v_{\phi} = c \sqrt{1 + \frac{\omega_{0e}^2}{(ck)^2}}$, где

$\omega_{0e} = e \sqrt{\frac{n_e}{m_e \epsilon_0}}$ — ленгмюровская частота, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое чис-

ло.

Произведя алгебраические преобразования, получим:

$$v_{\phi} = c \sqrt{1 + \frac{e^2 n_e}{4\pi^2 m_e \epsilon_0 v^2}}.$$

Из таблицы приложения 1 учебного пособия выпишем значения концентрации облака межзвездного газа (ионизованный водород): $n_e = 1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-3}$.

Произведем вычисления:

$$\begin{aligned} \text{а) } v_{\phi} &= 3 \cdot 10^8 \sqrt{1 + \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 1 \cdot 10^7}{4 \cdot 3,14^2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (1 \cdot 10^3)^2}} = \\ &= 8 \cdot 10^9 \text{ м/с.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{б) } v_{\phi} &= 3 \cdot 10^8 \sqrt{1 + \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 1 \cdot 10^7}{4 \cdot 3,14^2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (1 \cdot 10^5)^2}} = \\ &= 3,5 \cdot 10^8 \text{ м/с.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{в) } v_{\phi} &= 3 \cdot 10^8 \sqrt{1 + \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 1 \cdot 10^7}{4 \cdot 3,14^2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (1 \cdot 10^{13})^2}} = \\ &= 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.} \end{aligned}$$

В качестве домашнего задания следует предложить учащимся ознакомиться с содержанием § 18–20 учебного пособия, проанализировать решение задач (с. 91–92) и решить задачи, рекомендованные для самостоятельного решения (с. 92).

5. Методика изложения темы «Плазма в природе»

На изучение этой темы следует выделить 2 занятия по 2 часа. Желательная форма проведения занятий — семинары.

Тема первого семинара может быть такой:

«Магнитосфера Земли. Строение и физика ионосферы Земли. Полярные сияния».

Цели и задачи семинара

- Сформировать у учащихся систему знаний о геомагнитном поле, ионосфере Земли и процессах в ней;
- продолжить формирование умений и навыков работы с дополнительной (научной, научно-популярной, справочной и др.) литературой.

План семинара

1. Магнитное поле Земли.
2. Строение ионосферы Земли.
3. Физические процессы в ионосфере.
4. Полярные сияния.

Во вступительном слове учитель еще раз подчеркивает, что в состоянии плазмы находится примерно 99% вещества Вселенной — звезды, звездные атмосферы, галактические туманности и межзвездная среда.

Желательно показать школьникам фотографии звезд, звездных скоплений, туманностей и др. С этой целью можно спроецировать на экран цветные фотографии из нового учебника по астрономии (авторы: Б. А. Воронцов-Вельяминов, Е. К. Страут) или воспользоваться CD-диском «Астрономия», выпущенным фирмой «Физикон».

Плотность межзвездной среды очень мала, в среднем менее одного атома на 1 см^3 . Ионизация атомов межзвездной среды производится излучением звезд и космическими лучами — по-

токами быстрых частиц, пронизывающими пространство Вселенной по всем направлениям. В отличие от горячей плазмы звезд температура межзвездной плазмы очень мала.

Около Земли плазма существует в космосе в виде солнечного ветра, заполняет магнитосферу Земли, образуя радиационные пояса Земли и ионосферу. Процессами в околоземной плазме обусловлены магнитные бури и полярные сияния.

После небольшого введения ученик, который готовил выступление и реферат, рассказывает о магнитном поле Земли. Затем проводится собеседование по всему комплексу вопросов, связанных с магнитным полем Земли. Ученикам предоставляется возможность пояснить механизм геомагнетизма, его влияние на различные процессы. Этому способствует творческая работа учащихся по составлению докладов, сообщений (рефератов), в которых, кроме обобщения внешней информации, излагаются результаты экспериментов и собственных наблюдений. После того, как главные аспекты вопроса раскрыты, учитель предлагает прекратить обсуждение и перейти ко второму вопросу.

При пояснении причин образования поясов радиации второй ученик вскрывает физическую сущность данного вопроса, приводит результаты проведенных экспериментов по зондированию ионосферы. Хорошей иллюстрацией к той же теме может оказаться фрагмент кинофильма «Плазма — четвертое состояние вещества» и диафильм «Плазма», с помощью которых учащиеся получают представление о строении геомагнитного поля, ионосферы Земли и физических процессах, происходящих в ней. Эти видеоматериалы учащиеся не только с интересом смотрят, но и живо обсуждают. В ходе семинара учитель только формулирует вопрос, подлежащий рассмотрению, объявляет оценки и координирует действия учащихся.

Далее перед учащимися ставится проблема: почему происходит расслоение ионосферы Земли, что является источником ионизации, изменяется ли состояние ионосферы в течение суток? В обсуждении этой проблемы участвуют все ученики. В процессе обсуждения обобщаются, систематизируются знания, полученные на уроках химии, физики, из повседневной жизни, намечаются возможные варианты решения этой проблемы. Во время ответа ученика учитель может остановить его (т. е. зачесть ответ по данному пункту плана) и предложить продолжить изложение материала другим ученикам (выполнение этого пункта стимулирует внимание к ответам товарищей).

При объяснении механизма полярных сияний докладчик приводит данные о результатах исследований Института физики Земли и земного магнетизма, поясняет механизм движения заряженных частиц в геомагнитном поле, методы исследования данного явления. При этом учащиеся могут показать фотографии различных видов сияний, кто-то может кратко рассказать об одном из научных экспериментов — создании искусственно полярного сияния.

У доски готовятся одновременно 3–4 человека. Ответ школьника не перебивают, наводящие вопросы не задают (в целях экономии времени и развития самостоятельности). В семинаре принимают участие все ученики. По результатам занятия оценку выставляют в журнал. Оценку «отлично» ставят ученику, представившему два ответа на различные вопросы из плана семинара, либо использовавшему для одного ответа дополнительный внепрограммный материал, либо предложившему свой оригинальный пример или метод, установку, прибор, опыт.

В заключение учитель дает анализ научного содержания выступлений учащихся, решает спорные вопросы, обращает внимание на перспективы данной области исследования в недалеком будущем.

Следует учесть, что не все доклады, сообщения (рефераты) учащихся могут адекватно отражать научное содержание рассматриваемого вопроса, поэтому можно отметить хорошие работы, обратив внимание на те факты, которые были освещены с недостаточной глубиной. С авторами других докладов, сообщений (рефератов) целесообразно провести беседу после занятий с целью оказания им помощи в подготовке следующих выступлений. Лучшие рефераты передаются в школьную библиотеку, чтобы с ними могли ознакомиться другие учащиеся, что будет способствовать лучшему усвоению материала основного курса физики.

Отметим, что семинар ценен не функцией контроля, не тренировкой памяти, а как творческая лаборатория, в которой формируется физическое мышление учащихся. Кроме того, ученики лучше усваивают то, что они сами продумали, поставили эксперимент, сделали выводы и обобщения. Разумеется, педагогический эффект таких семинаров неизмеримо выше простого опроса учащихся по усвоению только что пройденного материала.

Кроме того, семинары во многом помогают подготовке и проведению итоговой научно-практической конференции, на

которой учащиеся выступают с докладами творческого, исследовательского характера, с обобщением изученного материала.

Ниже приводится дополнительный материал по теме «Полярные сияния», который можно использовать при подготовке к семинару.

Полярным сиянием называют свечение верхних слоев атмосферы, вызванное возбуждением атомов и молекул на высоте 90–1000 км потоками электронов и протонов с энергиями от сотен электронвольт до десятков килоэлектронвольт, вторгающимися в атмосферу из космоса. В видимой области спектра оно наблюдалось на протяжении веков, с появлением же спутников и ракет наблюдения полярных сияний расширились в инфракрасную, ультрафиолетовую и рентгеновскую области спектра.

Полярные сияния — конечный результат сложных процессов в околоземном пространстве, Соударения энергичных частиц с атомами и молекулами газов верхней атмосферы приводят к возбуждению последних. Возврат в равновесное состояние сопровождается излучением квантов характерных длин волн, т. е. появляется полярное сияние. Спектроскопические измерения позволяют судить о значении энергии вторгающихся частиц и их концентрации, о температуре слоев атмосферы, которые пересекают частицы, ее составе и степени ионизации частиц.

Ускоренно движущиеся заряженные частицы, попадая в верхнюю часть атмосферы, вызывают диффузное свечение, которое создает однородный светящийся фон. На этом фоне возникают яркие разноцветные подвижные и вспыхивающие полосы, пятна, лучи, дуги, которые обычно и называют полярным сиянием. Эти дискретные формы свечения вызываются концентрированными вторжениями пучков электронов, ускоренных к Земле электрическим полем вдоль линий магнитной индукции. Исследования полярных сияний показали, что частота их появления и интенсивность, особенно в средних широтах, явно связана с активностью Солнца.

Полярные сияния характеризуются в каждый данный момент разнообразием и причудливостью форм, которые можно подразделить на ряд элементарных:

1) малоподвижные однородные дуги и полосы в виде длинных лент, протянувшиеся по небосводу на сотни, иногда тысячи километров (рис. 5.1, а);

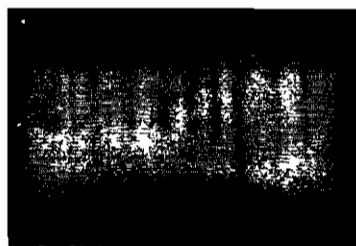
2) лучистые формы со значительной вертикальной протяженностью в виде отдельных лучей, пучков лучей или целых «занавесей» (рис. 5.1, б);

3) «корона», лучи которой вытянуты вдоль линий индукции геомагнитного поля и поэтому сходятся в перспективе в так называемой точке магнитного зенита (рис. 5.1, в);

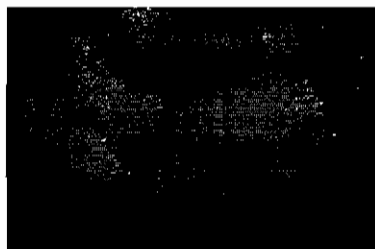
4) диффузное свечение в виде пятен или однородной поверхности — так называемая вуаль (рис. 5.1, г).



а



б



в



г

Рис. 5.1

Если полярное сияние слабое, оно воспринимается человеческим глазом как серо-зеленоватое, если яркое, — наблюдается игра красок и оттенков красного, зеленого, пурпурного и фиолетового цветов.

Количество дней с полярным сиянием увеличивается при переходе от средних к высоким широтам. Линия на поверхности Земли, вдоль которой полярные сияния наблюдаются каждый день (изохазма) располагается над центральной Аляской, сибирским побережьем Северного Ледовитого океана, пересекает полуостров Таймыр, северную оконечность Скандинавии, юг Исландии и южную оконечность Гудзонова залива в Канаде. В магнитоспокойные интервалы овал полярных сияний очень узок. Во время магнитных возмущений он существенно расширяется.

Детальный анализ процессов, ответственных за возникновение полярных сияний, дан Л. В. Тарасовым в книге «Физика в природе». Рассмотрим особенности движения заряженных частиц в неоднородном магнитном поле.

Предположим, что в неоднородное магнитное поле влетает положительно заряженная частица со скоростью $\vec{v}$, ориентированной в плоскости S перпендикулярно к оси Z (рис. 5.2). Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ в точке A разложим на две составляющие: перпендикулярную к плоскости S (составляющая $\vec{B}_1$) и лежащую в плоскости S (составляющая $\vec{B}_2$). Эта составляющая перпендикулярна к оси Z .

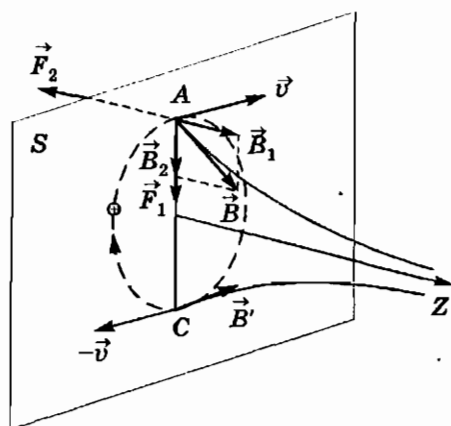


Рис. 5.2

На частицу со стороны магнитного поля действует сила Лоренца $\vec{F}_1$. Сила $\vec{F}_1$ ($F_1 = evB_1$) лежит в плоскости S . В этом нетрудно убедиться, если мысленно совершить поворот от вектора $\vec{v}$ к вектору $\vec{B}_1$ и воспользоваться правилом буравчика. Сила $\vec{F}_1$ заставляет частицу совершать обороты вокруг линий индукции магнитного поля. Однако остаться в пределах плоскости S частица не может. Ведь есть еще одна составляющая вектора магнитной индукции — $\vec{B}_2$. Она обуславливает силу $\vec{F}_2$ ($F_2 = evB_2$). Совершая мысленно поворот от $\vec{v}$ к $\vec{B}_2$ и применяя правило буравчика, убеждаемся, что сила $\vec{F}_2$ перпендикулярна к плоскости S , причем ее направление противоположно направлению оси Z . Во всех точках штриховой окружности, изображенной на

рис. 5.2, составляющая магнитной индукции, лежащая в плоскости S , будет направлена к центру окружности (в этом можно убедиться, если выполнить разложение вектора магнитной индукции в какой-нибудь другой точке, например в точке C). Таким образом, во всех точках окружности на частицу будет действовать сила $\vec{F}_2$, направленная противоположно оси Z . Эта сила будет выталкивать частицу из плоскости S в сторону уменьшения индукции магнитного поля, т. е. в направлении, в котором поле ослабевает.

Такой же результат мы получим, рассматривая не положительно, а отрицательно заряженную частицу. Такая частица совершает обороты вокруг линий индукции магнитного поля в обратную сторону. При этом она, как и положительно заряженная частица, будет выталкиваться полем в направлении, в котором поле ослабевает.

Следовательно, заряженная частица, влетевшая в неоднородное магнитное поле, будет описывать спиральную траекторию вокруг линий индукции с переменным радиусом спирали и ее шагом.

Предположим, что начальная скорость частицы направлена таким образом, что частица, описывая спираль, перемещается в область более сильного поля. Как мы уже выяснили, в этом случае она будет встречать противодействие со стороны поля; на частицу будет действовать сила, стремящаяся вернуть ее назад, в результате шаг спирали станет постепенно уменьшаться. Уменьшение будет происходить до тех пор, пока шаг не обратится в нуль, после чего частица, продолжая движение по спирали, начнет перемещаться обратно — в область более слабого поля. Теперь указанная сила будет подгонять частицу, вследствие чего шаг спирали начнет возрастать.

На рис. 5.3, а показана спиралеобразная траектория частицы, перемещающейся вперед вдоль оси Z , т. е. в направлении усиления магнитного поля. Видно, что радиус спирали и ее шаг постепенно уменьшаются. На рис. 5.3, б показана траектория частицы уже после того, как поле заставило ее начать перемещение назад; теперь шаг и радиус спирали постепенно возрастают. Если вначале частица двигалась по сворачивающейся спирали, то после изменения направления перемещения она двинется по разворачивающейся спирали.

Направление движения частицы вокруг линии индукции магнитного поля сохраняется неизменным. Если смотреть на

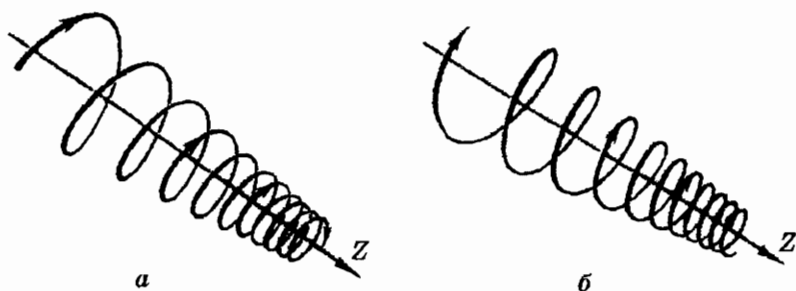


Рис. 5.3

положительно заряженную частицу так, чтобы ось Z была направлена к наблюдателю, то частица будет закручиваться по часовой стрелке как при ее приближении к наблюдателю, так и при ее удалении от наблюдателя. Отрицательно заряженная частица будет закручиваться при тех же условиях наблюдения против часовой стрелки.

Объяснение поведения заряженных частиц в неоднородном магнитном поле можно полностью применить для объяснения их поведения в неоднородном магнитном поле Земли.

На рис. 5.4 показана упрощенная картина линий индукции магнитного поля Земли. Буквами N и S обозначены Северный и Южный полюса магнитного поля Земли, буквами С и Ю — Северный и Южный географические полюса.

Однако исследования показали, что геомагнитное поле имеет более сложную структуру вследствие влияния солнечного ветра.

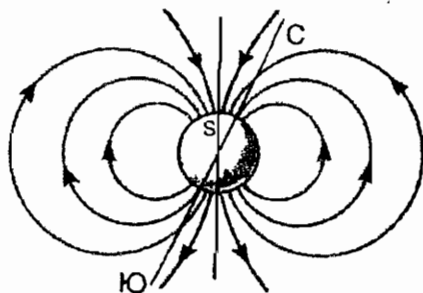


Рис. 5.4

В качестве домашнего задания следует предложить учащимся ознакомиться с содержанием § 21, 22, 24 учебного пособия.

Второй семинар можно посвятить более детальному ознакомлению с понятиями *космическая плазма, солнечный ветер, солнечные космические лучи*.

Солнечный ветер — непрерывный поток плазмы солнечного происхождения, распространяющийся приблизительно радиально от Солнца и заполняющий Солнечную систему до гелиоцентрических расстояний $R \approx 100$ а. е. (см. § 23 учебного пособия).

Приносимый солнечным ветром поток электронов, достигая Земли, начинает взаимодействовать с ее магнитным полем, в результате геомагнитное поле искажается (рис. 5.5). Солнечный ветер «сплюсчивает» поле с дневной стороны, а на ночной стороне образуется длинный «хвост» в сотни земных радиусов.

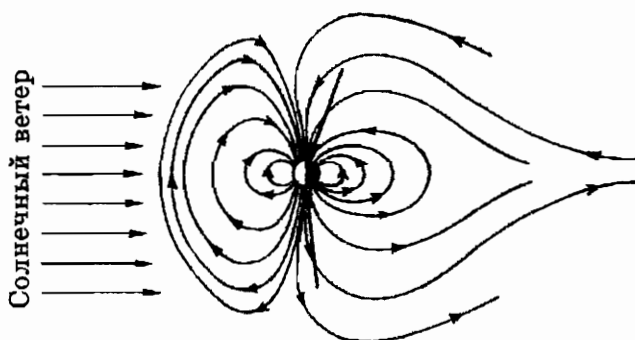


Рис. 5.5

Электроны захватываются геомагнитным полем и движутся по спиральным траекториям вокруг линий индукции магнитного поля Земли, приближаясь к приполярным областям. По мере приближения к ним электроны попадают в область более сильного магнитного поля. Как было показано выше, неоднородное магнитное поле «стремится» вытолкнуть заряженную частицу в направлении, в котором магнитное поле ослабевает. Электроны как бы «отражаются» магнитным полем и движутся в противоположном направлении, т. е. к противоположному полюсу. Далее процесс повторяется (рис. 5.6).

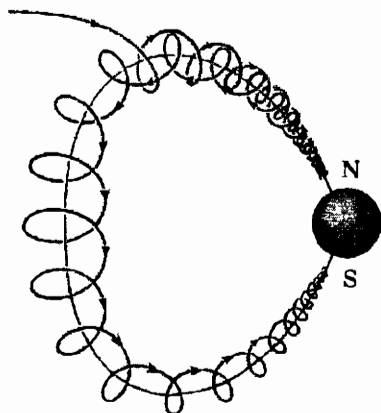


Рис. 5.6

1

Хотя на больших высотах атмосфера разрежена, столкновения электронов с атомами и молекулами атмосферы (главным образом, с молекулами азота и кислорода) происходят.

Молекулы при столкновении возбуждаются, но через короткое время возвращаются в основное состояние, испуская при этом фотоны. Положительные ионы рекомбинируют со свободными электронами и также испускают фотоны. Это излучение и наблюдается в виде полярного сияния. При этом ионизованные молекулы азота высвечивают коротковолновые (синие и фиолетовые) полосы спектра. Возбужденные атомы кислорода высвечивают длинноволновые (зеленые и красные) полосы. Этот фактор определяет основные цвета полярных сияний.

Практикум по решению задач

Задача 1. Нарисуйте диаграмму распределения концентрации электронов в ионосфере Земли от высоты и обозначьте области ионосферы.

Решение. С помощью исследований ионосферы установлено, что концентрация электронов n_e в ионосфере распределена по высоте неравномерно: имеются области или слои, где она достигает максимума.

Таких слоев в ионосфере несколько, и они не имеют резко выраженных границ. Ионосфера от основания до верхней границы делится на пять частей: область D , область E , область F , геиосфера и протоносфера. К области F примыкают слои F_1 и F_2 .

Характеристики основных областей ионосферы для средних широт

Область ионо- сферы	Высота максиму- ма, км	T_i, K	День: n_e (min), $см^{-3}$	День: n_e (max), $см^{-3}$	Ночь: n_e , $см^{-3}$
D	70	220	100	200	10
E	110	270	$1,5 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	3000
F	180	800–1500	$3 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	—
F ₁	220–280	1000–2000	$6 \cdot 10^5$	$25 \cdot 10^5$	$\approx 10^5$
F ₂	250–320	1000–2000	$2 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^5$	$\approx 3 \cdot 10^5$

График (диаграмма) приведен на рис. 5.7.

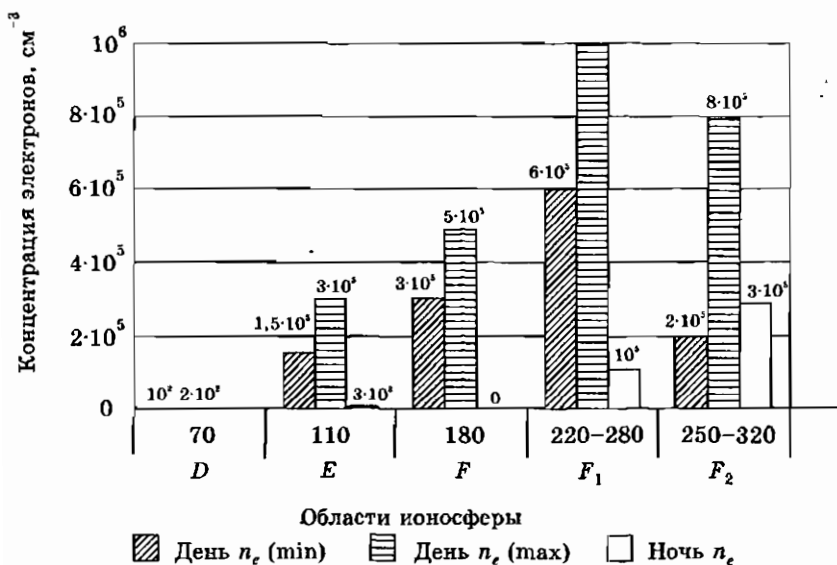


Рис. 5.7

Задача 2. Вычислите дебаевский радиус экранирования для плазмы солнечного ветра на расстоянии орбиты Земли.

Решение. Плазма солнечного ветра состоит в основном из протонов и электронов с приблизительно одинаковой концентрацией. Тогда дебаевский радиус экранирования можно опреде-

лить из формулы:

$$\frac{1}{r_D^2} = \frac{1}{r_{De}^2} + \frac{1}{r_{Dp}^2} \text{ или } r_D = \frac{r_{De} r_{Dp}}{\sqrt{r_{De}^2 + r_{Dp}^2}}.$$

Для вычисления дебаевского радиуса экранирования соответствующей компоненты воспользуемся формулой

$$r_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 kT}{ne^2}}.$$

Из таблицы приложения 1 учебного пособия выпишем значения концентрации и температуры:

$$n_e \approx n_p = 10 \text{ см}^{-3} = 10^7 \text{ м}^{-3}.$$

$$T_e = 1,5 \cdot 10^5 \text{ К.}$$

$$T_p = 5 \cdot 10^4 \text{ К.}$$

Произведем вычисления:

$$r_{De} = \sqrt{\frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1,5 \cdot 10^5}{1 \cdot 10^7 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}} = 8,5 \text{ м};$$

$$r_{Dp} = \sqrt{\frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 5 \cdot 10^4}{1 \cdot 10^7 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}} = 4,9 \text{ м};$$

$$r_D = \frac{8,5 \cdot 4,9}{\sqrt{8,5^2 + 4,9^2}} = 4,2 \text{ м.}$$

В качестве домашнего задания следует предложить учащимся ознакомиться с содержанием § 23, 25–26 учебного пособия.

6. Методика изложения темы «Плазма в технике»

На изучение этой темы программой отводится 6 часов (3 занятия). Наиболее целесообразно провести одно занятие в форме лекции, а два занятия в форме семинара.

Возможный учебно-тематический план

№	Тип занятия	Тема занятия	Вре- мя	Практическая часть
1	Лекция	Используй- вание плазмы в технике	2 ч	Демонстрации: – свечение газосветных трубок в поле высокой частоты – люминесцентная лампа – отклонение электронного пуч- ка в электрическом и магнитном полях – осциллограф – плазменный генератор релак- сационных колебаний – применение дугового разряда
2	Семинар	Плазменный МГД-генера- тор	2 ч	Доклады учащихся Решение задач Демонстрация действующей модели МГД-генератора
3	Семинар	Управляе- мый термо- ядерный синтез	2 ч	Доклады учащихся Решение задач Демонстрация кинофильмов и фотоматериалов

Безусловно, и в ходе лекции, и при проведении семинарских занятий большое внимание должно быть уделено проведению демонстраций, анализу решения задач, просмотру кино- и видеофильмов.

Лекция «Использование плазмы в технике»

Цель лекции — познакомить школьников с применением плазмы в технике, не вдаваясь в детальное разъяснение всех технических устройств. Это будет осуществлено в дальнейшем при проведении двух семинаров и выполнении трех лабораторных работ.

Во время лекции учитель постоянно должен общаться с классом, опираться на знания школьников, полученные при изучении физики, а также других предметов. Более правильным назвать эту форму проведения занятий «лекция-беседа».

Краткое содержание лекции-беседы

В начале лекции-беседы полезно дать общий обзор применений плазмы в технике для осознания школьниками значимости изучения свойств четвертого состояния вещества — плазмы. В настоящее время плазма находит широкое применение в самых разных областях науки и техники.

1. Высокотемпературная плазма из дейтерия и трития — основной объект исследования по управляемому термоядерному синтезу (УТС). Овладеть управляемым термоядерным синтезом — это означает овладеть самым богатым и дешевым источником энергии. Термоядерным горючим является морская вода и на первом этапе литий. Решение проблемы УТС навсегда избавит человечество от забот об источниках энергии. Кроме того, при УТС горючее превращается в гелий, поэтому термоядерная энергия снижает загрязнение окружающей среды по сравнению с атомными электростанциями. Важно отметить, что освоенные виды энергии, к сожалению, довольно скоро могут истощиться. Атомные электростанции могут еще несколько сотен лет снабжать человечество энергией, но огромное количество радиоактивных отходов и опасность последствий в случае аварии ограничивают возможность перехода на атомную энергетику.

Все это делает актуальным поиск альтернативных источников энергии. Над проблемой УТС человечество бьется около 50 лет. Есть надежда, что эта сложнейшая проблема будет решена. К 2010–2015 гг. планируется завершить строительство токамак-реактора ITER с полной мощностью термоядерных реакций не менее 1 ГВт при времени непрерывного горения плазмы, определяемого десятками минут. Стоимость проекта оценивается в 5 млрд долларов США. К 2030–2035 гг. планируется

закончить строительство первого демонстрационного термоядерного реактора, способного производить электроэнергию.

Эта тема детально будет обсуждаться на третьем занятии. На лекции желательно показать фотографии современных токамаков.

2. Низкотемпературная плазма находит применение в газоразрядных источниках света, освещающих улицы городов, и в красочных рекламных иллюминациях, люминесцентных лампах дневного света, широко применяемых не только в учреждениях, но и в жилых домах, в газовых лазерах, в плазменных телевизионных дисплеях, в которых цветное изображение создается с помощью множества газоразрядных индикаторов, в термоэмиссионных преобразователях внутренней энергии в электрическую энергию, в магнитогидродинамических генераторах. Если «обратить» МГД-генератор, то образуется плазменный двигатель, весьма перспективный для длительных космических полетов. Плазмотроны, создающие струи плотной низкотемпературной плазмы, широко применяются в различных областях техники. В частности, с их помощью режут и сваривают металлы. В плазмохимии низкотемпературную плазму используют для получения некоторых химических соединений, которые не удается получить другим путем.

На лекции желательно показать разные виды газового разряда. На рис. 6.1 представлен школьный прибор — спектральная трубка, — позволяющий продемонстрировать тлеющий газовый разряд.

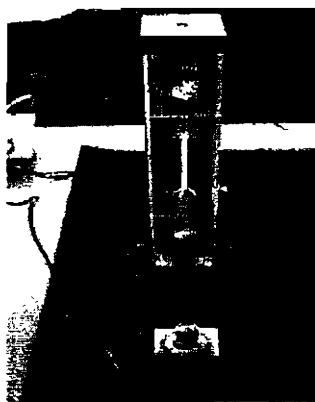


Рис. 6.1

3. Плазма твердого тела занимает особое место в широчайшем применении плазмы в технике. Плазменные технологии используются для антикоррозионной и упрочняющей обработки металлов. С помощью плазменного напыления создают алмазоподобные пленки и тонкопленочные покрытия, кардинально изменяющие фрикционные и прочностные свойства материалов.

На лекции полезно решить несколько задач, цель которых — показать практическое использование плазмы в технике. Так, например, в ниже приведенной задаче рассматривается применение газового разряда для стабилизации напряжения.

Задача. Для стабилизации напряжения применяют газоразрядную лампу (стабилитрон).

Схема включения лампы показана на рис. 6.2. При изменении силы тока в стабилитроне от 5 до 15 мА напряжение на нем практически не изменяется и остается равным 150 В. Сопротивление нагрузки $R_n = 10$ кОм. Чему равны сопротивление R и напряжение U , при которых напряжение на нагрузке остается постоянным при изменениях входного напряжения на 10%?

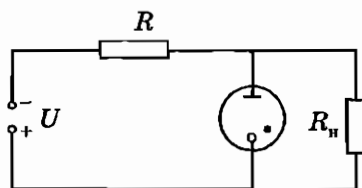


Рис. 6.2

Решение. Сила тока I_n через нагрузку постоянна и равна:

$$I_n = \frac{U_n}{R_n}. \quad (1)$$

Вычислим ее: $I_n = 15$ мА. Так как сила тока в стабилитроне изменяется от 5 до 15 мА, то сила тока в резисторе сопротивлением R изменяется от 20 до 30 мА.

Запишем закон Ома для предельных режимов работы стабилитрона:

$$1,1U - U_n = RI_{\max}, \quad (2)$$

$$0,9U - U_n = RI_{\min}. \quad (3)$$

Решая совместно уравнения (2) и (3), получим:

$$U = \frac{U_n(I_{\max} - I_{\min})}{0,9I_{\max} - 1,1I_{\min}}, U = 300 \text{ В};$$

$$R = \frac{1,1U - U_n}{I_{\max}}, R = 6 \text{ кОм}.$$

В качестве домашнего задания следует предложить учащимся ознакомиться с содержанием § 27, 29 учебного пособия.

Семинар **«Плазменный магнитогидродинамический генератор (МГД-генератор)»**

Можно предложить такой план проведения семинара по данной теме: желающим учащимся предлагается подготовить доклады по следующим темам:

- Принцип работы МГД-генератора.
- Схема устройства МГД-генератора.
- Преимущества МГД генератора перед электромеханическими генераторами.
- Технические трудности создания промышленных МГД-генераторов.
- Области применения МГД-генераторов.
- Демонстрация действующей модели МГД-генератора (эту модель предлагается сконструировать одному или двум ученикам за месяц до проведения семинара).
- Решение задач, связанных по тематике с принципом работы МГД-генератора.

(Подбор задач должен носить познавательный характер, а отнюдь не характер тренировки в вычислениях. В процессе решения правильно подобранных задач учащиеся осознанно, а не формально, усваивают новый материал, приучаются самостоятельно отыскивать в справочной литературе нужные физические величины, оценивать полученные результаты.)

План этого семинара и список необходимой литературы распечатываются и предлагаются всем учащимся.

При подготовке докладов школьники знакомятся с содержанием книг, статей в журналах, в Интернете. Важно, чтобы за обилием технических характеристик не утратилась физическая компонента, ясное понимание всех особенностей МГД-генерато-

ра. Желательно, чтобы все ученики после проведения семинара смогли ответить на следующие вопросы:

1. Как образуется ЭДС на обкладках МГД-генератора?
2. Чем определяется внутреннее сопротивление МГД-генератора?
3. Чем определяется мощность МГД-генератора и как ее можно увеличить?
4. Почему КПД МГД-генератора существенно выше КПД тепловых электростанций и каковы пути дальнейшего увеличения КПД МГД-генератора?

Для правильного ответа на эти вопросы полезно решить задачи, предлагаемые в главе 6 учебного пособия для самостоятельного решения.

Задача 1. Рассчитайте ЭДС, мощность во внешней цепи и КПД МГД-генератора, если площадь электродов $S = 4,5 \text{ м}^2$ и расстояние между ними $d = 3 \text{ м}$. Индукция магнитного поля $B = 5 \text{ Тл}$, скорость плазменного потока $v = 1500 \text{ м/с}$, удельное сопротивление $\rho = 0,15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, электрическое сопротивление нагрузки $R = 0,2 \text{ Ом}$.

Решение. Принципиальная схема МГД-генератора представлена на рис. 6.3

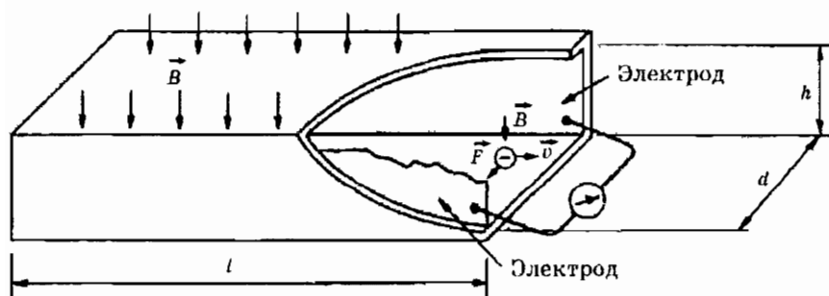


Рис. 6.3

При движении заряженных частиц в магнитном поле они отклоняются под действием силы Лоренца и на обкладках МГД-генератора возникает ЭДС, равная:

$$|\mathcal{E}| = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| = \left| \frac{\Delta(BS)}{\Delta t} \right| = \frac{Bvd\Delta t}{\Delta t} = Bvd.$$

Вследствие этого в цепи пойдет электрический ток. Сила тока определяется законом Ома для полной цепи: $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$, где r — внутреннее сопротивление МГД-генератора. Его можно найти по формуле $r = \frac{\rho d}{S}$.

Электрическая мощность, выделяемая во внешней цепи МГД-генератора, равна $P = I^2 R$. Используя записанные выше формулы, получаем выражение для искомой мощности:

$$P = \left(\frac{vBdS}{RS + \rho d} \right)^2 R.$$

Подставляя данные задачи, получаем:

$$\mathcal{E} = 22,5 \text{ кВ}; P = 1,12 \cdot 10^9 \text{ Вт} = 1,12 \text{ ГВт}.$$

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P} = \frac{\mathcal{E}^2 R / (r + R)^2}{\mathcal{E}^2 / (r + R)} = \frac{R}{R + r} = \frac{1}{1 + r/R} = \frac{1}{1 + \rho d / (SR)} = 0,67 \text{ (67\%)}.$$

Задача 2. Используя данные предыдущей задачи, рассчитайте максимальную мощность МГД-генератора. При каком значении внешнего сопротивления (нагрузки) она будет достигнута? Чему будет равен КПД генератора в этом случае?

Решение. Максимальная мощность выделится при равенстве внешнего и внутреннего сопротивления МГД-генератора: $R = r$ (доказательство этого утверждения будет приведено ниже). Следовательно, внешнее сопротивление при условии выделения максимальной мощности должно быть равно $R = r = \frac{\rho d}{S} = 0,01 \text{ Ом}$. Отсюда получаем, что максимальная мощность МГД-генератора, выделяемая на нагрузке сопротивлением $R = r = 0,01 \text{ Ом}$, равна:

$$P_{\text{max}} = I^2 R = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R + r)^2} = \frac{\mathcal{E}^2}{4R}.$$

Подставляя данные, получим: $P_{\text{max}} = 1,25 \cdot 10^9 \text{ Вт} = 1,25 \text{ ГВт}$; $\eta = 0,5 \text{ (50\%)}$.

Существует несколько способов доказательства утверждения, что мощность максимальна при выполнении равенства $R = r$. Приведем два, основанных на исследовании на максимум выражения для мощности.

$$1) \quad P = I U = I (\mathcal{E} - Ir) = I\mathcal{E} - I^2 R.$$

$$\frac{dP}{dI} = \mathcal{E} - 2IR = 0.$$

Из полученного выражения следует: $I = \frac{\mathcal{E}}{2R}$.

Сравнивая полученное выражение с законом Ома для полной цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}, \text{ получим: } R = r.$$

$$2) \quad P = I^2 R = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R + r)^2} = \frac{\mathcal{E}^2}{\left(R + 2r + \frac{r^2}{R}\right)}.$$

Искомая мощность максимальна, если знаменатель минимален.

$$\text{Исследуем его на минимум: } \frac{d\left(R + 2r + \frac{r^2}{R}\right)}{dR} = 0,$$

$$1 - \frac{r^2}{R^2} = 0, \text{ откуда следует, что } r = R.$$

Задача 3. Используя данные задачи 1, рассчитайте необходимую концентрацию электронов в плазме для того, чтобы ее удельное сопротивление было равно $\rho = 0,15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Известно, что при характерных для плазмы МГД-генератора параметрах (температура $T = 2000 \text{ К}$ и давление $p = 10^5 \text{ Па}$) время свободного пробега электронов τ (время релаксации электронов) равно приблизительно $\tau = 10^{-12} \text{ с}$.

Решение. Из электронной теории проводимости следует, что $\rho = \frac{m}{e^2 n \tau}$, где m — масса электрона, e — элементарный электрический заряд. Отсюда следует, что искомая концентрация равна: $n = \frac{m}{e^2 \rho \tau}$.

Подставляя числовые значения, получим: $n = 2,4 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

Возникает вопрос, откуда в газе при температуре $T = 2000 \text{ К}$ может образоваться такое громадное количество

электронов, ведь при этой температуре газ практически состоит из неионизованных атомов. Для ионизации газа нужна температура 8000 К, а такую температуру не выдержат стенки МГД-генератора.

Проблема решается с помощью легкоионизирующихся добавок. Ими могут быть соли калия или цезия. Добавка к продуктам сгорания угля дешевых и легкодоступных соединений калия (1%) увеличивает концентрацию электронов в 10^{24} раз.

Ученикам, проявляющим интерес к теоретическим рассуждениям, можно предложить самостоятельно вывести выражение $\rho = \frac{m}{e^2 n \tau}$.

Из электронной теории следует, что при постоянной силе тока $I = envS$ средняя скорость упорядоченного движения свободных электронов постоянна. Но, так как на электроны действует сила $F = eE$, то движение без ускорения возможно лишь при наличии силы сопротивления, зависящей от скорости электрона: $F_c = -kv$, где k — коэффициент сопротивления.

Второй закон Ньютона можно записать в виде:

$$m \frac{\Delta v}{\Delta t} = eE - kv, \quad (1)$$

откуда следует:
$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{eE}{m} - \frac{kv}{m}.$$

Для момента времени, когда $E = 0$, второй закон Ньютона имеет вид:

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = -\frac{k}{m} v, \quad (2)$$

т. е. быстрота убывания скорости до нуля прямо пропорциональна коэффициенту k . Величина $\frac{m}{k}$ имеет размерность времени. Обозначим ее через τ . Эта величина определяет время, в течение которого скорость электрона уменьшается до нуля: чем она больше, тем медленнее происходит убывание скорости. Это легко объяснить: большим значениям τ соответствует большая масса частиц и меньший коэффициент сопротивления.

С использованием τ уравнение (2) можно записать так:

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = -\frac{1}{\tau} v.$$

Второй закон Ньютона для этого случая примет вид:

$$eE = \frac{m}{\tau} v. \text{ Откуда } v = \frac{e\tau}{m} E.$$

Сравнивая с законом Ома в дифференциальной форме:

$$j = \sigma E, \text{ где } j = ev = \frac{e^2 n \tau}{m} E, \text{ получим, что } \sigma = \frac{e^2 n \tau}{m}. \text{ Так как}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma}, \text{ то } \rho = \frac{m}{e^2 n \tau}.$$

Анализ решения этих задач позволяет сделать следующие выводы:

- ЭДС МГД-генератора пропорциональна скорости потока плазмы, индукции магнитного поля и расстоянию между пластинами.
- Внутреннее сопротивление МГД-генератора пропорционально удельному сопротивлению плазмы и расстоянию между пластинами и обратно пропорционально площади пластин.
- Мощность, выделяемая на внешнем участке цепи, пропорциональна квадрату скорости потока плазмы, квадрату индукции магнитного поля и зависит от соотношения между внутренним сопротивлением МГД-генератора и сопротивлением нагрузки.
- Мощность МГД-генератора максимальна при равенстве его внутреннего сопротивления сопротивлению внешней нагрузки.
- КПД МГД-генератора зависит от соотношения между его внутренним сопротивлением и сопротивлением нагрузки. При $r \ll R$ КПД стремится к 100%, при максимальной мощности он равен 50%.

Так как главная цель МГД-генератора — высокий КПД, то соотношение между r и R подбираются так, чтобы КПД был максимален.

Полезно вспомнить выражение для КПД тепловой машины:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \text{ из которого следует, что КПД тем}$$

выше, чем меньше отношение $\frac{T_2}{T_1}$. Для плазмы в МГД-гене-

раторе это отношение может достигать 0,1, а значит, КПД при этом будет равен 90%. В реальных условиях КПД

МГД-генератора меньше (50–60%), однако он существенно выше КПД тепловых электростанций.

- Для работы МГД-генератора необходимо в струю горячего газа (продуктов сгорания угля или природного газа) вводить легкоионизирующиеся добавки с целью резкого увеличения концентрации электронов.

После рассмотрения принципиальных вопросов можно рассказать и о других особенностях МГД-генераторов: простота устройства и надежность работы, отсутствие трущихся поверхностей и вообще движущихся частей (в МГД-генераторе происходит непосредственное превращение энергии топлива в электрическую энергию), возможность развить огромную мощность за несколько секунд после запуска.

В США экспериментальный МГД-генератор был построен в 1959 г., он имел мощность всего 11,5 кВт. В СССР первый МГД-генератор появился в 1965 г., а в 1971 г. была запущена первая промышленная электростанция с МГД-генератором мощностью 25 МВт.

Схемы энергетических установок с МГД-генератором с открытым и закрытым циклами представлены на рис. 6.4 и 6.5.

В МГД-генераторе с открытым циклом (см. рис. 6.4) газ после камеры сгорания вместе с ионизирующими добавками попадает в МГД-канал. При этом вырабатывается электроэнергия, а затем газ вращает турбины тепловой электростанции (ТЭС), что существенно повышает КПД установки. Но при этом, несмотря на фильтр, часть добавок выбрасывается в атмосферу. В этом случае используются дешевые добавки — соли калия.



Рис. 6.4

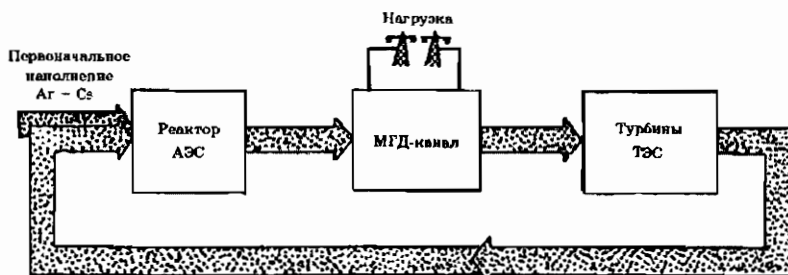


Рис. 6.5

В МГД-генераторе с закрытым циклом (см. рис. 6.5) газ после МГД-канала и турбин возвращается в зону нагрева, в качестве которой может быть реактор атомной электростанции (АЭС). Потерь газа и ионизирующих добавок нет, и поэтому можно использовать в качестве добавки цезий, проводимость которого существенно больше, чем у калия.

В то же время следует сказать и о технических трудностях, которые не позволили МГД-генераторам вытеснить традиционные генераторы: проблемы сохранения высоких температур, получения сильных магнитных полей, создания магнитов, не нарушающих теплоизоляцию плазменного потока, использования материалов, выдерживающих высокие температуры (до 3000 К), химически активных продуктов сгорания и добавок.

Необходимо подчеркнуть одно существенное различие между физическими задачами, которые возникают в связи с проблемой магнитогидродинамического преобразования энергии, и физической тематикой исследований по термоядерному синтезу. Это различие состоит в том, что в одном случае объектом исследования должна являться плазма с температурой астрономического порядка, в другом — обычная низкотемпературная плазма.

Магнитогидродинамический генератор по принципу действия есть *обратимое устройство*: он может превращать кинетическую энергию плазмы в электрическую или же ускорять плазму с помощью электродинамических сил за счет потребления энергии от внешнего источника электропитания. Во втором случае — это ускоритель или инжектор плазмы, который может быть использован в качестве основы для *реактивного плазменного двигателя*.

Плазменные двигатели. Область возможного применения ускорителей плазмы относится к технике сверхдальних космических полетов. Для того чтобы будущий космический корабль обладал необходимой маневренностью и представлял собой автономное транспортное средство, а не баллистический объект, нацеливаемый заранее и предоставляемый далее на волю инерции и сил тяготения, необходимо снабдить этот корабль источниками энергии и реактивными двигателями, с помощью которых можно было бы осуществлять сложные движения в пространстве. Если траектория полета требует длительного использования средств маневрирования, то очень важным становится вопрос о запасе реактивного топлива.

Сила, создаваемая двигателем, по модулю равна $F = \mu u$, где μ — массовый расход вещества, выбрасываемого реактивной струей, а u — модуль скорости струи относительно ракеты. При заданной силе потребление вещества обратно пропорционально скорости u . В реактивных двигателях обычного типа, использующих химическое топливо, скорость струи порядка 10^3 м/с. При тяговом усилии, равном всего лишь 100 Н, скорость 10^3 м/с соответствует потреблению 8,5 т вещества в сутки. В этих условиях космический корабль имеет очень ограниченные возможности для маневрирования на дальних трассах. Переход к плазменным инжекторам со скоростью струи порядка 10^5 м/с позволяет снизить запасы реактивного топлива в десятки раз. При этом, однако, значительно повышается расход энергии, так как мощность, расходуемая на ускорение потока, равна $P = \frac{\mu u^2}{2}$ и поэтому для заданной силы растет пропорционально u . Отсюда следует, что возможность применения плазменных инжекторов для управления космическими кораблями связана с разработкой мощных источников энергии для космических полетов. Что касается конструкции и режима работы плазменного реактивного двигателя, то здесь имеется довольно широкий простор для технической фантазии. Простейшим типом такого двигателя может служить коаксиальный инжектор плазмы.

На рис. 6.6 показана одна из простейших схем импульсного плазменного инжектора, предназначенного для генерации быстрых плазменных сгустков. Инжектор состоит из двух коаксиальных металлических цилиндров, между которыми создается высокое напряжение с помощью конденсаторной батареи, служащей резервуаром электрической энергии. Через быстродейст-

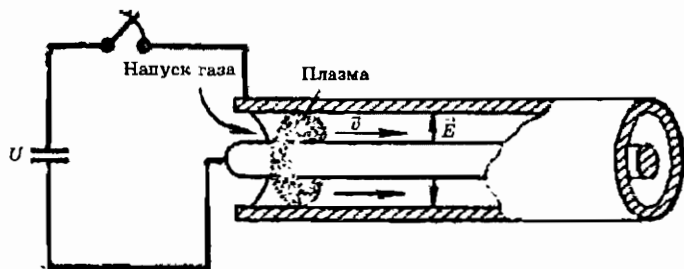


Рис. 6.6

вующий клапан в пространство между цилиндрами в некоторый момент времени впускается определенная порция газа. Прежде чем газ полностью растечется по всему объему инжектора и начнет вытекать через его открытый конец, к инжектору подключается заряженный конденсатор, благодаря чему между цилиндрическими электродами происходит разряд и образуется плазма. Ток течет по радиальным направлениям. Взаимодействие тока и созданного им магнитного поля создает электродинамическое давление, которое гонит плазму вдоль инжектора, постепенно ускоряя ее.

Чем больше сила тока в плазме, и чем меньше масса газа, тем большую скорость приобретает плазменный сгусток на выходе из инжектора.

В приведенном выше объяснении действия простейшего плазменного инжектора все сводится к макроскопической картине ускорения плазмы под влиянием макроскопических сил, а физический механизм процесса остается в значительной степени скрытым.

Рассмотрим поэтому, как ведут себя в данном процессе частицы, принадлежащие обоим компонентам плазмы.

Электродинамическая сила, создающая ускорение плазмы, приложена к электронной компоненте, так как радиальный ток в инжекторе создается легкими электронами, а не тяжелыми ионами. Вместе с тем в разогнанном плазменном сгустке подавляющая часть приобретенной кинетической энергии приходится на ионы — опять-таки из-за их относительно большой массы (продольные скорости электронов и ионов по условию квазинейтральности должны быть практически одинаковы). Таким образом, оказывается, что сила, приложенная к электронам, в конечном счете «накачивает» энергию в ионную компоненту.

Причину такого слегка парадоксального эффекта нетрудно обнаружить. Как только под действием электродинамических сил электроны немного сдвинутся вдоль инжектора, возникнет продольное электрическое поле, которое заставит ионы двигаться вслед за электронами. Сила, действующая со стороны этого поля на электроны, будет почти полностью компенсировать электродинамическую силу, так как для разгона электронов, имеющих ничтожную массу, требуется лишь очень малая сила.

Хотя отдельные ионы фактически разгоняются электрическим полем, в итоге получается, что плазма, как целое, приобретает свою скорость под действием электродинамической силы, обусловленной взаимодействием тока и магнитного поля.

Полезно предложить школьникам в качестве домашнего индивидуального задания изготовить действующую модель МГД-генератора. Одна из возможных моделей описана в статье Е. Б. Мягкова (Физика в школе. — 1966. — № 1. — С. 60). Предлагаем описание этой модели.

Внутри керамической трубки от старого реостата диаметром 3–4 см укрепляют друг против друга, вдоль образующих цилиндра, две полоски листовой стали, которые будут выполнять функции токосъемников. Верхние концы токосъемников желательно закрепить при помощи клемм. Керамическую трубку помещают между полюсами дугообразных лабораторных магнитов, которые закрепляют в обойме одноименными полюсами так, чтобы они представляли собой один магнит с широкими полюсами. В обойму достаточно соединить 8–10 магнитов.

Наибольший эффект даст пламя высокой температуры и большой скорости истечения газов, например пламя паяльной лампы, ацетиленовой горелки. Удовлетворительные результаты можно получить от газовой горелки или лабораторной горелки. Для увеличения концентрации заряженных частиц необходимо добавить в пламя горелки легкоионизируемые атомы щелочных металлов. Для этого ватку, смоченную в растворе поваренной соли или других солей щелочных металлов, вводят в пламя горелки и в этот момент наблюдают показания гальванометра.

Разность потенциалов, возникающую между токосъемниками, обнаруживают гальванометром чувствительностью порядка 10^{-6} А/дел. В случае отсутствия демонстрационного гальванометра такой чувствительности можно использовать лабораторный микроамперметр.

Опыт получается и с набором из пяти дугообразных магнитов, между полюсами которых помещается горелка. Токосъем-

ники помещаются в направлении, перпендикулярном скорости потока плазмы и индукции магнитного поля. Зеркальный школьный гальванометр показывает отклонение, которого не наблюдается, если убрать магниты. Это свидетельствует о том, что показания гальванометра связаны с явлением электромагнитной индукции, а не с другими явлениями.

Лабораторная установка (рис. 6.7), моделирующая МГД-генератор, описана в статье ученика 11-го класса А.Власенина, ЦДТ, г. Златоуст (<http://www.piramida-maxima.ru/issues/2003>). Приведем выдержку из этой статьи.

...Я попытался создать модель лабораторной установки МГД-генератора открытого типа. В качестве камеры для сгорания можно использовать бензиновую лампу или газовую горелку, а сам прибор выглядел так:

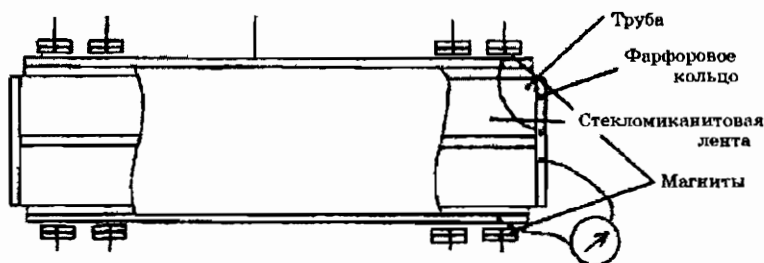


Рис. 6.7

Нержавеющая труба диаметром $d = 4$ см и длиной $l \approx 50$ см была разрезана вдоль, так чтобы половинки трубы не соприкасались, и каждая была отдельным электродом. Для создания необходимого зазора между половинками трубы использовалось три фарфоровых кольца, которые были вставлены внутрь посередине и с концов трубы. Между половинками трубы был проложен стекломиканит. Для придания жесткости сверху все покрыто жаропрочной стекломиканитовой лентой. Для снятия эффекта Холла использовалась медная пластина (0,25 мм). Применение меди обусловлено тем, что она достаточно термостойка и имеет хорошую проводимость. Затем сверху и снизу с помощью стекломиканитовой ленты на каждую половинку трубы закреплялось по 12 небольших ферромагнитов. Верхнюю половину трубы, являющуюся электродом, соединили с компенсационной шиной, а затем проводники от компенсационной шины и нижней половины трубы присоединили к прибору для

фиксирования электрического тока (зеркальному гальванометру). В качестве фиксирующего и изоляционного материала применялась стекломиканитовая лента, так как она способна выдерживать высокие температуры. Температура продуктов сгорания составляет примерно 700 °С, а в центре может быть еще и выше.

В качестве рабочего тела в таком приборе выступают продукты сгорания бензина или пропана. Для того чтобы газ стал электропроводным, его надо ионизовать до определенной степени, что осуществляется нагреванием до температур, достаточных для начала термической ионизации. Степень ионизации можно повысить, если обогащать газ введением небольшого количества солей щелочных металлов (K, Cs, Na). Раскаленная плазма движется по каналу, при этом внутренняя энергия превращается в кинетическую энергию и скорость плазмы возрастает до 2000 м/с. Металлический проводник и плазма в целом нейтральны. Влетая в область сильного магнитного поля, частицы плазмы разных знаков под действием силы Лоренца $\vec{F}_L$ разделяются.

Электроны, достигнув нижнего электрода, движутся по внешней цепи по нагрузке сопротивлением R_n к другому электроду, где нейтрализуют положительные ионы. Мощность, выделяемая во внешней цепи, может быть использована для практических нужд. Когда внешняя цепь разомкнута (R_n стремится к бесконечности), между электродами возникает наибольшая разность потенциалов (ЭДС индукции). Она может достигать нескольких сотен или тысяч вольт.

Испытание опытной установки и подсчет КПД

При включении опытной установки через 30 с было зафиксировано напряжение 610 мВ и возникал электрический ток 800 мА. Следовательно, полезная мощность полученной установки: $P_{\text{п}} = IU = 0,488$ Вт.

Учитывая теплоту сгорания бензина, его массу и время работы бензиновой лампы, была подсчитана затраченная мощность:

$$P_3 = \frac{qmt}{t} = \frac{25,5 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{30} = 1,7 \text{ Вт},$$

где q — удельная теплота сгорания бензина, Дж/кг; m — масса сгоревшего топлива, кг; t — время, с.

КПД экспериментальной установки равен:

$$\eta = \frac{P_p}{P_a} \cdot 100\% = 28,7\%.$$

С применением компенсационной шины было зафиксировано напряжение 830 мВ и сила тока 900 мА и $\eta = 43,9\%$, т. е. применение компенсационной шины снизило эффект Холла и увеличило КПД в полтора раза...

В качестве домашнего задания следует предложить учащимся ознакомиться с содержанием § 28 учебного пособия и решить задачи, рекомендованные для самостоятельного решения (с. 136).

Семинар «Управляемый термоядерный синтез (УТС)»

Можно предложить желающим учащимся для докладов такие темы:

1. Энергетический кризис и пути его разрешения. Высокотемпературные термоядерные реакции.
2. Способы осуществления самоподдерживающейся термоядерной реакции в природе и технике (звезды, водородная бомба).
3. Способы осуществления управляемой термоядерной реакции в технике.
4. Удержание плазмы с помощью магнитных полей: прямые магнитные ловушки, стеллараторы, токамаки, сферагоры.
5. Методы нагрева плазмы.
6. Импульсные процессы.
7. Холодный ядерный синтез: «за» и «против».

Прокомментируем каждый из этих докладов.

1. Энергетический кризис и пути его разрешения. Высокотемпературные термоядерные реакции

В течение всей своей истории человечество мало заботилось об источниках энергии. Считалось, что в недрах Земли достаточно угля, нефти, газа. В настоящее время выяснилось, что сжигать в топках эти ценнейшие ископаемые неразумно, так как их запасы ограничены, а, кроме того, продукты сгорания загрязняют воздух планеты. Доля различных источников энергии в общемировом производстве по последним данным такова: 38% — нефть, 23% — природный газ, 22% — уголь, 7% —

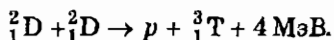
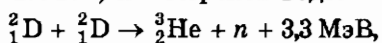


Рис. 6.8

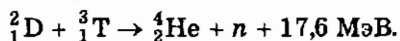
атомная энергия, 5% — вода, 3% — возобновляемые источники энергии (рис. 6.8).

При таком интенсивном потреблении основных природных ресурсов их запасов хватит, по разным оценкам, от 100 до 200 лет. Запасов ядерного горючего для АЭС значительно больше, чем запасов угля, нефти и газа, но основная часть ядерной энергии сосредоточена в неактивном уране с массовым числом 238. Кроме того, с ростом потребления ядерной энергии создается серьезная проблема захоронения радиоактивных отходов.

Выход из положения может дать управляемый термоядерный синтез (УТС), запасы ядерного топлива для которого практически безграничны. Наиболее эффективным и доступным термоядерным горючим является изотоп водорода — дейтерий (D), который содержится в любых соединениях водорода (в соотношении 1:6400) и в морской воде:

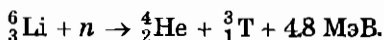


Однако такие реакции могут проходить только при громадных температурах, необходимых для преодоления кулоновских сил отталкивания (кулоновского барьера). Даже с учетом так называемого туннельного эффекта для осуществления указанных ядерных реакций необходимы температуры свыше 500 млн К (что соответствует энергии 75 МэВ). Такие температуры возможны только в недрах звезд. Более реальна для использования в технике реакция соединения дейтерия с другим изотопом водорода — тритием:



Во-первых, эта реакция идет с большим энергетическим выходом, во-вторых, ее скорость в 100 раз больше, чем у первых двух, в-третьих, необходимая температура для осуществления этой реакции в 10 раз меньше. Температуру 50 млн К можно создать, но очень трудно удержать в течение длительного времени — это самая главная проблема, которую человечество не может решить до настоящего времени.

Есть и еще одна проблема, связанная с тем, что тритий радиоактивен и в природе отсутствует. Для его производства нужен литий:



Литий содержится в достаточном количестве в руде, а, кроме того, в морской воде в количестве, в тысячи раз превышающем разведанные рудные запасы.

Если предположить, что термоядерные электростанции будут производить 10 трлн кВт·ч в год (столько, сколько сегодня производят все электростанции Земли), то потребление дейтерия и лития составит всего 1500 и 4500 т в год соответственно. Это в миллионы раз меньше разведанных запасов дейтерия и лития.

Решение проблемы УТС навсегда избавит человечество от забот об источниках энергии. Кроме того, при УТС горючее превращается в гелий, поэтому при получении термоядерной энергии снижается загрязнение окружающей среды по сравнению с атомными электростанциями. Заметим, что хотя исходное топливо (дейтерий и литий) и конечный продукт (гелий) нерадиоактивны, промежуточные продукты радиоактивны (это тритий, а также активированные нейтронами конструкционные материалы внутренних стенок и теплоноситель). Однако, радиационная опасность, связанная с термоядерным реактором, в миллион раз меньше опасности, вызванной использованием уранового реактора той же мощности.

2. Способы осуществления самоподдерживающейся термоядерной реакции в природе и технике (звезды, водородная бомба)

В настоящее время реализованы два способа осуществления самоподдерживающейся термоядерной реакции:

- медленная реакция, самопроизвольно происходящая в недрах Солнца и других звезд, в которых масса реагирующего вещества (дейтерия и трития) настолько велика, что оно

удерживается и уплотняется (до 10^5 кг/м³ в центре Солнца) гравитационными силами;

- быстрая реакция неуправляемого характера, происходящая при взрыве водородной бомбы. В качестве ядерного взрывчатого вещества в водородной бомбе используются ядра легких элементов (например, ядра дейтерия и лития). Высокая температура, необходимая для начала термоядерного процесса, достигается в результате взрыва атомной бомбы, которая входит в состав водородной бомбы.

В современной теории управляемого термоядерного синтеза (УТС) сформулированы требования и определены пределы термодинамических параметров, при которых можно надеяться на достижение цели. При высокой температуре дейтерий-тритиевой плазмы (для простоты изложения в дальнейшем речь пойдет только о реакции ${}^2_1\text{D} + {}^3_1\text{T} \rightarrow {}^4_2\text{He} + n$) некоторые столкновения ядер будут заканчиваться реакциями с выделением термоядерной энергии. Число удачных столкновений будет возрастать с ростом концентрации ядер дейтерия и трития. Условие существования реакции синтеза состоит в том, чтобы выделившаяся энергия превышала энергию, уносимую из плазмы электромагнитным и корпускулярным излучением. При равенстве этих величин реакция синтеза будет протекать, но генерации избытка энергии для полезного использования происходить не будет. Это равенство называется условием зажигания термоядерной реакции. В оценочном аналитическом виде оно впервые было получено американским физиком Дж. Д. Лоусоном в 1957 г. и называется критерием Лоусона:

$$L(T) \leq n\tau, \quad (1)$$

где τ — среднее время удержания плазмы в активной зоне реактора; $L(T)$ — коэффициент Лоусона, зависящий от температуры, типа легких ядер и потерь на излучение.

Оптимальная температура для реакции $\text{D} + \text{T}$ приблизительно равна $2 \cdot 10^8$ К, а для реакции ${}^2\text{D} + {}^2\text{D} — 10^9$ К. Критерий Лоусона соответственно равен 10^{14} и 10^{15} с/см³.

Таким образом, для осуществления реакции синтеза в дейтерий-тритиевой плазме необходимо обеспечить высокую температуру и концентрацию ионов в течение определенного времени.

3. Способы осуществления управляемой термоядерной реакции в технике

В настоящее время рассматриваются два способа решения проблемы УТС:

- длительный ($\tau > 0,17$ с) нагрев дейтерий-тритиевой плазмы малой концентрации ($n \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$) в определенном объеме при температуре порядка 10^8 К ;
- высокоскоростной (τ около 10^{-9} с) нагрев малых объемов конденсированного термоядерного топлива высокой концентрации ($n = 10^{23} \text{ см}^{-3}$).

Основной задачей при реализации *первого* направления является обеспечение длительного времени удержания плазмы. Для предотвращения соприкосновения со стенками рабочего объема используются магнитные поля различной конфигурации. Из магнитных ловушек в настоящее время специалисты считают наиболее перспективной ловушку, называемую токамаком (тороидальная камера с магнитными катушками). В конце 70-х годов XX в. страны, развивающие это направление, объединили свои усилия по разработке проекта интернационального термоядерного экспериментального реактора. Цель реализации этого проекта — техническая демонстрация УТС. Наиболее мощный современный токамак JET [конструкция Европейского Сообщества] был создан в городе Абингдоне, недалеко от Оксфорда. Токамак JET высотой 10 м вырабатывает плазму с температурой до 100 млн К и сохраняет ее при достаточной плотности в течение нескольких секунд.

Второе направление исследований с плазмой высокой концентрации начало развиваться учеными США и СССР в начале 60-х годов XX в. Альтернативность этого направления выражается в том, что его разработчики предложили не преодолевать огромные трудности по удержанию неустойчивых плазменных сгустков, а создать такие условия, при которых значимая часть термоядерного топлива сгорела бы быстрее, чем оно разлетится. Временные параметры этого процесса определялись инерцией топливной смеси. Это направление получило название инерциального термоядерного синтеза (ИТС).

Идея исходила из того, что дейтерий-тритиевая смесь в конденсированном (замороженном) состоянии сверхбыстро нагревается до температуры порядка 10^8 К . Длительность сохранения объема топлива зависит от времени разлета плазмы, которое определяется величиной d/v (d — линейный размер

области, занятой плазмой, v — характерная скорость частиц нагретой плазмы). Это время можно принять за время удержания плазмы, которое входит в критерий Лоусона (1). Тогда можно оценить размер d : $d/v > Lv/n$. Используя для дейтерий-тритиевой плазмы значения $L = 10^{14}$ с/см³, $v = 10^8$ см/с и $n = 5 \cdot 10^{22}$ см⁻³, получим $d = 2$ мм, а время удержания $\tau = 2 \cdot 10^{-9}$ с.

Давление в нагретом топливе определяется энергией, переданной внешним источником, энергией, выделившейся в результате протекания термоядерной реакции, и энергией ударно-волновых процессов, инициируемых высокоскоростным нагреванием. Такой реактор будет импульсным. Импульсная термоядерная установка подобна двигателю внутреннего сгорания, в котором происходят взрывы горючего, периодически подаваемого в рабочую камеру. Таким образом, трудности УТС, которые заключались в том, чтобы удержать плазму, перенеслись в ИТС на проблему мгновенно нагреть ее.

Усилия, направленные на развитие ИТС, принесли уже такие результаты, которые позволяют ему конкурировать с более традиционным направлением УТС с магнитным удержанием плазмы. Однако трудности на пути реализации этого направления снова выстраиваются в термоядерную крепость.

4. Удержание плазмы с помощью магнитных полей: прямые магнитные ловушки, стеллараторы, токамаки, сфераторы

Для осуществления термоядерных реакций нужны такие высокие температуры, при которых возможно в принципе удерживать плазму только с помощью магнитных полей разных конфигураций. Однако это сделать оказалось сложно в связи с разнообразными неустойчивостями плазмы и связанной с ними аномальной (быстрой) диффузией плазмы через магнитные стенки.

На семинаре нужно осветить два типа неустойчивостей: гидродинамические и кинетические. Первые наиболее опасны, но эти неустойчивости легче избежать. Кинетические неустойчивости не приводят к движению плазмы как целого, но они ускоряют диффузию.

Далее следует рассказать о несложных прямых магнитных ловушках и лишь затем перейти к наиболее перспективным установкам, создающим магнитные поверхности: токамакам и стеллараторам.

Токамак. Высокотемпературная плазма является хорошим проводником. Поэтому ток в тороидальной камере, наполненной плазмой, можно возбудить так, как возбуждают ток во вторичной обмотке трансформатора. Во внутренней части тороида достаточно места, чтобы разместить первичную обмотку. Однако необходимо обеспечить равновесие и устойчивость тока. Известно, что если по гибкой петле проволоки, свободно лежащей на столе, пропустить ток, то она вытягивается в кольцо. Таким образом, на круговой ток действует своеобразная сила, направленная от центра кольца. Чтобы скомпенсировать эту силу и тем самым обеспечить равновесие, необходимо создать магнитное поле, линии индукции которого перпендикулярны к плоскости кольца. Это магнитное поле создается специальными проводниками, находящимися вне камеры.

На рис. 6.9 приведена схема токамака закрытого типа (цифрами обозначены: 1 — катушка продольного магнитного поля, 2 — плазма, 3 — направление тока в плазме, 4 — линия индукции магнитного поля).

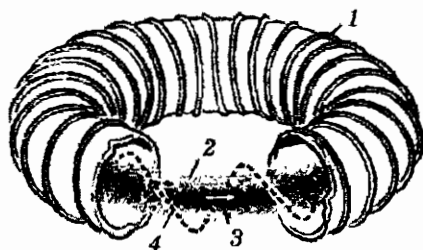


Рис. 6.9

И наконец, для устойчивости тока необходимо, чтобы шаг винтовой линии магнитного поля на магнитной поверхности d был больше периметра камеры Π . Условие магнито-гидродинамической устойчивости: $d > \Pi$.

Отношение $d/\Pi = q$ называют запасом устойчивости. Обычно приходится работать при q , равном 2 или 3. Шаг d зависит от соотношения между индукцией продольного магнитного поля, создаваемого внешними катушками с током, и индукцией магнитного поля, создаваемого током в плазме. Поэтому, чем больше сила тока в плазме, тем меньше шаг линии магнитной индукции. Фактически условие устойчивости — это ограничение на значение силы тока в плазме.

При выполнении условий равновесия и устойчивости на установках «Токамак» получены значения температуры и времени жизни плазмы большие, чем на какой-либо другой установке.

Стелларатор. Мы рассмотрели схему токамака, в котором магнитная поверхность создается продольным (тороидальным) магнитным полем и током, текущим по плазме.

А возможно ли создать тороидальную магнитную поверхность внешними токами, текущими по проводникам, расположенным вне объема, ограниченного магнитной тороидальной поверхностью? Ответ на этот вопрос положительный. И он известен давно, с самого начала работ над проблемой УТС. Нашел этот ответ известный астрофизик Лайман Спитцер, как говорят, во время созерцания звезд, и поэтому назвал установку стелларатором (от лат. слова *stella* — звезда).

Стелларатор (рис. 6.10) имеет две обмотки. Обмотка 1 создает продольное (тороидальное) поле и ничем не отличается от аналогичной обмотки в токамаке. Зато обмотка 2, заменяющая ток, текущий в плазме 3, — винтовая. Она состоит из проводников, намотанных на тороид по винтовой линии. Один виток обмотки напоминает винтовую магнитную линию индукции. Обычно используют один, два, три, четыре винтовых проводника, симметрично расположенных на поверхности камеры. Таким образом, винтовая обмотка характеризуется двумя параметрами — шагом и числом витков.

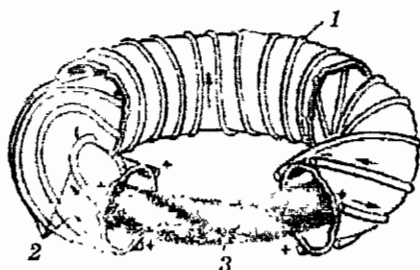


Рис. 6.10

Стелларатор обладает очевидными преимуществами по сравнению с токамаком. В стеллараторе магнитные поверхности задаются контролируемым образом. Легко изменяется шаг винтовых линий индукции магнитного поля. Кроме того, стелларатор может работать в стационарном режиме, так как не

надо поддерживать ток в плазме; следовательно, не нужно создавать переменный магнитный поток, проходящий через ось установки. Однако недостатки стелларатора в настоящее время перевесили его достоинства. Главным его недостатком является сложность системы винтовых обмоток. Кроме того, эти обмотки занимают дополнительное место между камерой и катушками внешнего поля. Когда на стеллараторе Принстонского университета убрали винтовые обмотки, чтобы работать в режиме токамака, это позволило увеличить поперечный размер камеры и плазмы почти в три раза, поднять температуру и время жизни частиц почти в десять раз. Таким образом, в настоящее время при одинаковых затратах в токамаке можно получить более горячую и дольше живущую плазму, чем в стеллараторе.

Развитие работ на стеллараторах в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН позволяет надеяться, что в будущем стеллараторы сыграют роль при создании термоядерного реактора. Работы по стеллараторам ведутся также в ФРГ и Англии. Плазма в стеллараторах значительно более холодная, чем в токамаках. Но изучение диффузии показывает, что плазма в стеллараторах ведет себя спокойно и примерно так, как это следует из теории. Это дает основание надеяться, что при разработке более дешевых конструкций стеллараторов они будут успешно конкурировать с токамаками.

5. Методы нагрева плазмы

Джоулев нагрев. При описании принципа действия токамака мы отметили, что ток, текущий по плазме, играет важную роль в образовании тороидальных магнитных поверхностей. Но этот ток выполняет и другую не менее важную функцию — он нагревает плазму. Такое «совмещение профессий» является большим преимуществом токамака.

Однако по мере роста температуры увеличивается проводимость плазмы, а джоулев нагрев уменьшается. С помощью этого механизма нагрева можно достигнуть температуры 2–3 кэВ, а для термоядерного синтеза нужна температура 10 кэВ. Для дальнейшего прогресса установок «Токамак» необходимы иные методы нагрева плазмы.

Инейекция быстрых нейтральных атомов. Суть этого метода заключается в том, что нейтральные атомы спокойно пересекают магнитное поле, окружающее кольцо плазмы, так как на нейтральный атом магнитное поле не действует. Но в области горячей плазмы нейтральные атомы ионизируются, и на образо-

вавшиеся ионы магнитное поле действует, удерживая их внутри плазмы. Соударяясь с другими частицами плазмы, ионы передают им часть своей энергии, что приводит к повышению температуры плазмы.

В принципе возможны и другие методы нагрева плазмы: инжекция быстрой плазмы; инжекция быстрых электронов; резонансный циклотронный нагрев; нелинейный высокочастотный нагрев; адиабатное сжатие плазмы; нагрев плазмы лучом лазера; омический нагрев и др.

Омический нагрев плазмы. При омическом нагреве электроны ускоряются электрическим полем. Но электроны не достигают больших скоростей, так как, соударяясь с другими электронами и ионами, они теряют приобретенную энергию. Таким образом, приобретенная кинетическая энергия превращается во внутреннюю энергию (хаотизируется). Если плазма не очень плотная, то энергия от электронов к ионам и обратно передается медленнее, чем от электронов к электронам или от ионов к ионам. Это явление связано с большой разницей в массах иона и электрона. Для обмена энергией между частицами одинаковой массы достаточно одного соударения. Здесь уместна аналогия с игрой в бильярд. Иногда налетающий шар ударяется о неподвижный и, передав ему свою энергию, останавливается. Такое явление невозможно при большой разнице масс соударяющихся шаров. Необходимо примерно $M/(2m)$ соударений, чтобы шар малой массы m передал свою энергию шару большой массы M .

Таким образом, электрон должен по крайней мере 1000 раз соудариться с протоном, чтобы передать ему всю свою энергию. Поэтому в разреженной плазме температуры ионов и электронов не совпадают и говорят о двух температурах — ионной и электронной. Так как по мере увеличения температуры частота электрон-ионных соударений уменьшается, то уменьшается эффективность нагрева плазмы в области высоких температур. Такое свойство обуславливается только особенностями взаимодействия между электронами и ионами при парном соударении.

Однако в плазме может существовать другой механизм взаимодействия между частицами — это коллективные процессы. Электроны и ионы взаимодействуют через хаотические электрические поля, и результирующий эффект такой же, как при парном соударении. Но вероятность этого процесса другая и не уменьшается с ростом температуры. Такие эффективные соу-

дарения увеличивают диффузию частиц, делают ее аномальной. Но одновременно в такой плазме возрастает и эффективность нагрева.

6. Импульсные процессы

До сих пор мы детально рассматривали медленные процессы, длящиеся доли секунд. Не очень плотная плазма удерживалась от разлета магнитным полем. Однако существует и другой противоположный метод решения проблемы УТС. Пусть плазма будет такой же плотной, как твердое тело, т. е. $n \approx 10^{22} \text{ см}^{-3}$. Тогда согласно условию Лоусона время реакции $\tau = \frac{10^{14}}{10^{22}} = 10^{-8} \text{ с}$. При таком значении времени термоядерная

энергия должна вырабатываться. Конечно, плазму с плотностью 10^{22} см^{-3} и температурой 10^4 эВ удержать магнитным полем разумной величины невозможно, так как давление в этом случае превышает 10^{13} Па . Поэтому остается надеяться, что реакция успеет произойти до того, как все вещество разлетится. При $T = 10^4 \text{ эВ}$ скорость v дейтрона равна примерно 10^8 см/с . Если использовать твердую крупинку смеси дейтерия и трития радиусом $R = 0,1 \text{ см}$, то за время разлета можно принять время удвоения радиуса: $\tau = \frac{R}{v} = 1 \text{ нс}$.

Таким образом, нужно нагреть крупинку смеси дейтерия и трития радиусом 1 мм (конечно, эта крупинка сначала находится при температуре ниже температуры отвердевания водорода) до температуры $T = 10^4 \text{ эВ}$ за 1 нс. Чтобы выполнить эту задачу, необходимо иметь мощные технические средства — лазеры и электронные пучки.

Хотя принципы лазерного и электронного УТС одинаковы, целесообразно рассмотреть эти два метода отдельно, так как физические свойства лазерного и электронного пучков различны.

Лазерный УТС. Предложение об использовании лазеров для нагрева крупинки из смеси дейтерия и трития было высказано Н. Г. Басовым и О. Н. Крохиным еще в 1962 г. Потребовались десятилетия упорной работы, прежде чем удалось сформулировать требования к лазерному термоядерному реактору. Но до сих пор основные данные получены не из физического эксперимента, а расчетом. В этих расчетах с помощью самых современных электронно-вычислительных машин определены условия оптимального использования лазеров.

Результаты этих расчетов показывают, что лазерный УТС может оказаться полезным, если объем крупинки из твердого водорода уменьшить в тысячи раз. Тогда скорость термоядерной реакции возрастет в миллион раз и легче выполнить условие Лоусона. В этом случае плотность водорода превысит плотность всех известных веществ. Для этого, по-видимому, необходимо иметь крупинку твердого водорода с плотностью от 600 до 2000 г/см³, т. е. превышающей плотность платины более чем в 100 раз. Чтобы получить такую плотность твердого водорода, необходимо создать давление 10^{16} – 10^{17} Па. Такие давления пока недоступны современной науке и технике.

Электронный УТС. В настоящее время большое распространение получил новый источник импульсной мощности — импульсный сильноточный электронный ускоритель (ИСЭУ). Длительность импульса, создаваемого такими ускорителями, может иметь значения от 10 до 60 нс, мощность — от 10^{12} до 10^{13} Вт, энергия электронов — от 1 до 15 МэВ, сила тока от 10^4 до 10^6 А; при этом КПД ускорителей больше 30%.

Возможно несколько способов использования электронных пучков для УТС. Электронный пучок можно было бы использовать точно так же, как лазерное излучение. Для этого необходимо сфокусировать электроны на твердую крупинку из смеси дейтерия и трития, уменьшить ее объем в 1000 раз и нагреть до температуры 10 кэВ. Расчеты показывают, что для этого нужно поднять мощность ИСЭУ до $5 \cdot 10^{14}$ Вт, а плотность тока до 10^{10} А/см². Особенно трудно осуществить фокусировку электронного пучка. Несмотря на многие трудности все большее количество ученых начинают работать над электронным УТС. Их привлекает значительно более высокий КПД ускорителя (ИСЭУ) по сравнению с лазерным ускорителем, простота устройства, высокие мощности и надежность в работе.

Рассматриваются также и другие способы использования электронного пучка. Во-первых, электронный пучок может быть использован для нагрева плазмы в токамаках, стеллараторах или прямых магнитных ловушках. Во-вторых, можно использовать тот факт, что электронный пучок может создаваться непосредственно внутри твердого тела. Если к тонкой нити приложить высокое напряжение, то по ней пойдет ток, который нагреет нить выше температуры кипения, в результате вся нить испарится. Но ток не оборвется, так как газ превратится в проводящую плазму. Магнитное поле тока сжимает плазму, препятствуя ее разлету.

7. Холодный ядерный синтез: «за» и «против»

В серьезной научной печати в последнее время стали появляться статьи о возможности осуществления синтеза легких ядер при низких температурах. Одна из них от 7 марта 2002 года находится по адресу: <http://www.membrana.ru/articles/global/2002/03/07/150800.html> и называется «Холодный ядерный синтез — научная сенсация или фарс?». В ней говорится, что ядерные физики сумели произвести «холодный ядерный синтез».

В других изданиях скептически отнеслись к этому сообщению. «Холодный термоядерный синтез» пользуется у физиков такой же репутацией, что и вечный двигатель, машина времени и прочие экспериментально недоказанные или недоказуемые, гипотетические предположения, которые идут вразрез с законами физики и химии. Считается, что «холодный синтез» — это типичный пример голословного заявления, некорректного «грязного» эксперимента.

Задание для докладчика на семинаре: проследить в Интернете за публикациями, посвященными теме «Холодный ядерный синтез: "за" и "против"» и подготовить соответствующее сообщение.

В качестве домашнего задания следует предложить учащимся ознакомиться с содержанием § 30 учебного пособия.

7. Лабораторный практикум к элективному курсу «Плазма — четвертое состояние вещества»

Повышение научного уровня элективного курса непосредственно связано с усилением его экспериментальной основы, в первую очередь с постановкой лабораторного практикума. Работы лабораторного практикума направлены на применение полученных знаний на практике и приобретение исследовательских навыков. Они отличаются от работ основного курса не столько своеобразной тематикой, сколько творческим характером, исследованием более широкого круга вопросов, чем в одночасовых лабораторных работах.

Для успешного выполнения работ лабораторного практикума необходима соответствующая учебно-материальная база, в создании которой принимают участие школьники. Они пополняют физический кабинет установками, сконструированными и изготовленными на уроках и во внеурочное время. Конструирование и изготовление физических установок на основе технических требований, предъявляемых к ним, прививает учащимся навыки технического расчета, закрепляет знание физических законов. Опыт показал, что такой метод, как проведение занятий по конструированию и изготовлению физических установок, можно рекомендовать как эффективный метод, дополняющий другие методы преподавания элективных курсов.

Например, при изучении темы «МГД-генератор» его работу можно показать при помощи действующей модели, которая может быть изготовлена в школьных условиях, совместно с учащимися.

Лабораторный практикум можно поставить так, чтобы ученики выполняли работы в соответствии с детальной инструкцией. Однако гораздо полезней, если перед ними ставится проблема исследования и предоставляется право подбора необходимого оборудования и приборов. Это придает процессу выполнения работ практикума исследовательский характер. Значение поиска

самостоятельного решения и эффективность его осуществления в практикуме нет необходимости доказывать.

Опыт проведения занятий по изучению элективных курсов показал, что интерес учащихся к работам исследовательского характера был выше, и знания оказывались более прочными и глубокими, чем при проверочной форме выполнения работ физического практикума.

Вместе с тем, этот же опыт показал, что не все учащиеся могут выполнять задания лабораторного практикума без помощи учителя. Эта помощь может быть реализована по-разному.

Учащимся, которые не знают, как приступить к выполнению экспериментального задания, выраженного в краткой форме, предлагается список необходимого оборудования, указывается, на основании каких законов можно выполнить данное задание, дается инструкция по использованию физических приборов.

Тем учащимся, которым недостаточно таких кратких указаний, предлагается подробная инструкция, в которой раскрывается содержание и метод выполнения работы и описывается порядок ее выполнения.

Выбор одного из трех типов заданий: краткого, с указаниями к выполнению работы и с детальной инструкцией предоставляется *ученику*.

Оценка за выполнение лабораторной работы ставится с учетом правильности выполнения работы, а также с учетом *выбора типа задания*.

Опыт проведения таких практикумов показывает, что оценка за правильное выполнение работы при выборе краткого задания оценивается из 10 баллов, при выборе задания с указаниями — оценивается из 9 баллов, при выборе подробной инструкции оценивается из 8 баллов. Оценка «отлично» выставляется за 7 баллов. Таким образом, даже те ученики, которые выбрали детальную инструкцию, могут получить отличную оценку, но для этого им можно потерять не более одного балла. Ученики, работающие по заданию с подсказкой, для получения оценки «отлично» могут потерять 2 балла, а учащиеся, выполняющие работу самостоятельно с использованием указаний, выраженных в краткой форме, — могут потерять 3 балла и при этом получить отличную оценку.

Ниже приводятся подробные инструкции к выполнению 5 лабораторных работ, которые целесообразно выполнять в форме лабораторного практикума после изучения теоретического материала элективного курса.

Лабораторная работа № 1

Измерение отношения заряда электрона к его массе

(к главе 1 «Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях»)

Оборудование: прибор для демонстрации свойств электронных пучков; источник питания ВУП-2; источник питания ВС-24 или ИЗПП -1; линейка измерительная.

Содержание и метод выполнения работы

Электрон, влетая в магнитное поле со скоростью $\vec{v}$, перпендикулярной линиям индукции $\vec{B}$ магнитного поля, начинает двигаться по окружности радиусом R под действием силы Лоренца. Применяя второй закон Ньютона, получим:

$$evB = \frac{mv^2}{R}, \quad (1)$$

где e и m — абсолютное значение заряда и масса электрона, v — модуль скорости электрона, которую можно найти из условия:

$$eU = \frac{mv^2}{2}. \quad (2)$$

Здесь U — ускоряющее электроны напряжение ($U = 250$ В).

Из уравнений (1) и (2) следует:

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{R^2 B^2}. \quad (3)$$

Магнитное поле в данном эксперименте создается катушками Гельмгольца. Рассчитать индукцию магнитного поля этих катушек можно по формуле:

$$B = 0,71 \mu_0 I \frac{N}{r}, \quad (4)$$

где I — сила тока в катушках, N — число витков в них ($N = 445$), r — радиусы катушек. Коэффициент 0,71 определяется конструктивными особенностями катушек Гельмгольца, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

* Описание метода выполнения этой работы дано в соответствии с инструкцией к прибору, выпускаемому для школ.

Порядок выполнения работы

1. Подключите газоразрядную трубку к источнику питания ВУП для обеспечения накала катода трубки и создания анодного напряжения.

2. Включите прибор и подождите 5 мин. За это время образуется электронный пучок, сфокусированный модулятором и анодом. Чтобы электронный пучок был видимым, в газоразрядной трубке есть водородный генератор, представляющий собой полый цилиндр из гидрида титана, внутри которого расположено на нить накала. При нагревании нити водородный генератор выделяет водород, который ионизуется электронными ударами. Образованные положительные ионы водорода кулоновскими силами притяжения удерживают электроны в узком пучке. Одновременно с ионизацией атомов водорода происходит их возбуждение, ведущее к свечению водорода на пути движения электронного пучка.

3. Сформируйте электронный пучок. Для этого, изменяя напряжение на модуляторе ручками «фокус» и «анод», добейтесь создания такого электрического поля между электродами, которое ведет к сходимости электронного пучка. При увеличении напряжения на аноде яркость и длина электронного пучка возрастают.

4. Подключите катушки Гельмгольца с помощью двухполюсной вилки к источнику питания ВС-24 или ИЭПП-1 (к клеммам регулируемого постоянного напряжения 12 В). Между катушками создается в достаточной степени однородное магнитное поле. При этом электронный пучок искривляется и при правильной полярности включения образует винтовую линию. Поворачивая газоразрядную трубку, можно добиться, что электронный пучок принимает форму кольца радиусом $R \approx \frac{mv}{eB}$.

Изменяя напряжение на аноде, следите за изменением радиуса кольца.

5. Измерив радиус кольца R , силу тока I в катушках и напряжение U , рассчитайте искомое отношение $\frac{e}{m}$, используя выражения (3) и (4).

Вопросы для самопроверки

1. Вследствие какого процесса в данной установке образуется электронный пучок?

2. Зачем нужен водородный генератор и каков принцип его действия?
3. Почему происходит свечение водорода на пути движения электронного пучка?
4. Каким образом создается магнитное поле?
5. Почему электронный пучок изгибается и может принять форму окружности?
6. Чем определяются погрешности при проведении измерений и каким образом можно их уменьшить?

Лабораторная работа № 2

Измерение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли

(к главе 5 «Плазма в природе»)

Оборудование: тангенс-гальванометр; источник питания ВС-24; мультиметр.

Содержание и метод выполнения работы

Для определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли используют прибор, называемый тангенс-гальванометром (рис. 7.1). Прибор представляет собой катушку диаметром 0,21 м, содержащую 6 витков изолированного провода. В центре катушки на горизонтальной площадке расположена магнитная стрелка. Стрелка находится в корпусе, на котором имеется шкала для отсчета угла поворота. Корпус закреплен так, что линия 0–180° шкалы совпадает с плоскостью катушки тангенс-гальванометра. Для того чтобы не исказить магнитное поле, штатив прибора изготовлен из немагнитных материалов. На основании штатива размещены два параллельно соединенных резистора, общее сопротивление которых равно 12 Ом (может быть один резистор сопротивлением 12 Ом), и имеются клеммы для подключения источника питания и мультиметра. Резистор сопротивлением 12 Ом служит для защиты источника питания от перегрузки и используется для определения силы тока в катушке тангенс-гальванометра.

* Описание метода выполнения этой работы дано в соответствии с инструкцией к прибору, выпускаемому для школ.

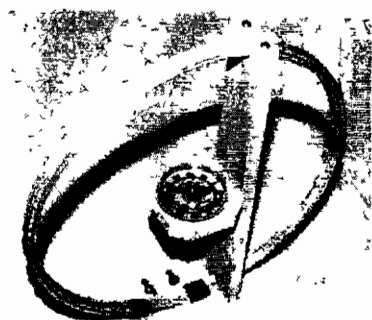


Рис. 7.1

При отсутствии тока в катушке магнитная стрелка устанавливается по направлению вектора индукции магнитного поля Земли, точнее, в направлении его горизонтальной составляющей. Поворачивая прибор вокруг вертикальной оси, можно совместить плоскость катушки с направлением горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли. Если по катушке пропустить ток, то он создаст свое магнитное поле. Вектор индукции этого поля в центре катушки направлен по оси катушки, т. е. лежит в горизонтальной плоскости, а модуль равен:

$$B_k = \frac{\mu_0 IN}{d}, \quad (1)$$

где I — сила тока в катушке, N — число витков, d — диаметр катушки, μ_0 — магнитная постоянная.

Горизонтальная составляющая индукции магнитного поля в центре катушки $\vec{B}$ представляет собой векторную сумму индукции $\vec{B}_k$ магнитного поля катушки и горизонтальной составляющей $\vec{B}_r$ индукции магнитного поля Земли (рис. 7.2). Именно в направлении вектора $\vec{B}$ и ориентируется магнитная стрелка.

Из рис. 7.2 видно, что $\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_k}{B_r} = \frac{1}{B_r} B_k$, где α — угол между

направлением магнитной стрелки и плоскостью катушки. Таким образом, зависимость тангенса угла отклонения магнитной стрелки от индукции магнитного поля катушки является линейной.

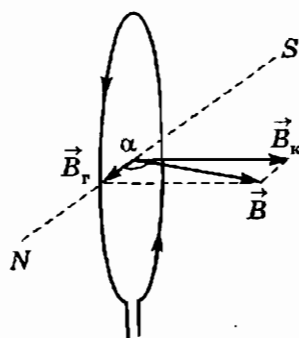


Рис. 7.2

Угловой коэффициент k прямой, построенной в координатах $(B_k, \operatorname{tg} \alpha)$, определяется модулем горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли.

При выполнении эксперимента вам необходимо измерить угол отклонения магнитной стрелки при различных значениях силы тока в катушке тангенс-гальванометра, построить график зависимости тангенса угла отклонения стрелки от модуля индукции магнитного поля катушки и определить модуль горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

Порядок выполнения работы

1. Соберите электрическую цепь в соответствии с рис. 7.3. Мультиметр включите в режим измерения постоянного напряжения до 20 В.

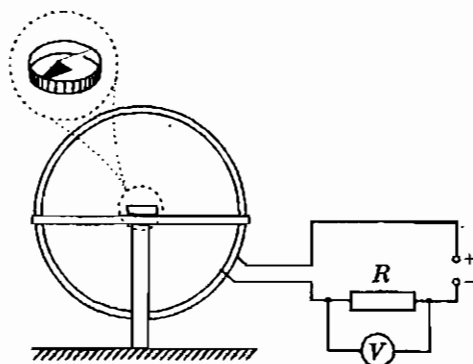


Рис. 7.3

2. Вращая катушку тангенс-гальванометра вокруг вертикальной оси, совместите северный полюс магнитной стрелки с нулевым делением шкалы компаса.

3. Включите источник питания, установите минимальный уровень выходного напряжения и плавно увеличивайте его до тех пор, пока стрелка компаса не начнет отклоняться. Если стрелка отклонилась в область углов $270-360^\circ$, измените полярность подключения источника питания. После успокоения колебаний магнитной стрелки запишите в таблицу значение угла ее отклонения (цена деления шкалы — 5°).

Запишите в таблицу показания мультиметра и продолжите эксперимент, последовательно увеличивая выходное напряжение источника питания и внося показания мультиметра в таблицу. При проведении измерений сила тока в цепи не должна превышать $0,5\text{ А}$, что соответствует напряжению 6 В , измеряемому мультиметром. После достижения этого значения повторите измерения при постепенном уменьшении напряжения на выходе источника питания.

4. Для обработки данных воспользуйтесь таблицей. Первый столбец таблицы должен содержать значения напряжения U на резисторе сопротивлением R . Во втором столбце таблицы запишите значения углов отклонения магнитной стрелки. Значения силы тока I_k в катушке тангенс-гальванометра, рассчитанные на основе закона Ома, запишите в третьем столбце. В четвертый столбец таблицы впишите вычисленные значения индукции магнитного поля, создаваемого катушкой тангенс-гальванометра в месте расположения магнитной стрелки. При этом используется формула (1). Пятый столбец таблицы предназначен для записи вычисленного значения тангенса угла отклонения магнитной стрелки.

№ опыта	$U, \text{ В}$	$\alpha, ^\circ$	$I_k, \text{ А}$	$B_k, \text{ Тл}$	$\text{tg}\alpha$
1					
2					
3					

5. Для определения модуля горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли необходимо построить график зависимости тангенса угла отклонения магнитной стрелки от индукции магнитного поля катушки. Для построения этой зависимости отложите по оси ординат значения тангенса угла

отклонения магнитной стрелки, а по оси абсцисс соответствующие им значения модуля индукции магнитного поля катушки. Вы увидите, что полученная зависимость близка к линейной.

6. Модуль горизонтальной составляющей магнитного поля Земли B_r вычисляется как величина, обратная угловому коэффициенту k прямой, построенной по экспериментальным данным на графике: $B_r = \frac{1}{k}$.

Вопросы для самопроверки

1. Как устроен тангенс-гальванометр?
2. Как устанавливается стрелка тангенс-гальванометра при отсутствии тока в катушке?
3. Как устанавливается стрелка тангенс-гальванометра при наличии тока в катушке?
4. Какая имеется зависимость между углом отклонения стрелки тангенс-гальванометра и индукцией магнитного поля катушки?

Лабораторная работа № 3 Регистрация космических лучей*

(к главе 5 «Плазма в природе»)

Оборудование: два счетчика Гейгера—Мюллера; выпрямитель ВУП; электронный осциллограф.

Содержание и метод выполнения работы

Космическими лучами называется поток частиц высокой энергии, приходящий на Землю из космического пространства. Первичные космические лучи у границы земной атмосферы имеют примерно следующий состав: 90% протонов, 9% ядер атомов гелия и около 1% приходится на ядра более тяжелых элементов. Первичное космическое излучение изотропно, и интенсивность его обычно постоянна во времени. Частицы первичного космического излучения обладают энергиями от 10^9 до 10^{19} эВ. Столкновения частиц первичного космического излучения с атомными ядрами в воздухе приводят к ядерным реакци-

* Эта работа поставлена О. Ф. Кабардиным; ее описание приведено в книге: О. Ф. Кабардин, В. А. Орлов, Н. И. Шефер «Лабораторные работы по физике для средних ПТУ» (М.: Высшая школа, 1976, с. 156–160).

ям, в результате которых возникают частицы вторичного космического излучения — быстрые протоны, нейтроны, альфа-частицы, пи-мезоны и осколки ядер. Частицы вторичного космического излучения, если они обладают достаточной энергией, могут вызвать новые ядерные реакции. В результате одного или нескольких актов ядерного взаимодействия (или ионизационных столкновений с атомами воздуха) частицы вторичного излучения растрачивают свою энергию уже на высоте около 10 км над уровнем моря. В верхних слоях атмосферы часть пи-мезонов успевает испытать распад до того, как они захватываются атомными ядрами. Это оказывается возможным благодаря чрезвычайно малому времени жизни пи-мезонов ($2,5 \cdot 10^{-8}$ с). Заряженные пи-мезоны распадаются на мю-мезоны и нейтрино, а нейтральные пи-мезоны — на гамма-кванты:

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu, \quad \pi^0 \rightarrow 2\gamma.$$

Значительная часть мю-мезонов, возникающих в верхних слоях атмосферы, достигает Земли. На уровне моря интенсивность потока мю-мезонов равна 0,75 частиц/(см²·мин), что составляет примерно $\frac{2}{3}$ полной интенсивности космического излучения. Около $\frac{1}{3}$ потока космического излучения над уровнем моря составляют электроны и позитроны, возникающие при распаде мю-мезонов, имеющих период полураспада около $2 \cdot 10^{-6}$ с:

$$\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu.$$

Если два счетчика Гейгера—Мюллера расположить один над другим и регистрировать электрические импульсы на их выходе, то можно установить, что в большинстве случаев импульсы счетчиков возникают в различные моменты времени. Причина появления импульсов — попадание в рабочий объем счетчика гамма-кванта или бета-частицы радиоактивного фона почвы, атмосферного воздуха и окружающих предметов. Один гамма-квант почти никогда не вызывает возникновения электрического разряда сразу в двух счетчиках, так как многие кванты после регистрации их одним из счетчиков перестают существовать, исчезая, например, при фотоэлектрическом поглощении.

Не могут вызвать возникновения импульсов одновременно в двух счетчиках и бета-частицы, так как обладают энергией, недостаточной для того, чтобы пройти сквозь стенки двух счетчиков.

Частицы космических лучей — мю-мезоны, электроны и позитроны — обладают настолько высокими энергиями, что способны пройти не только сквозь стенки двух счетчиков, но и через слои железа или свинца толщиной в несколько сантиметров.

На всем пути прохождения через вещество частицы космических лучей производят ионизацию и возбуждение его атомов. Поэтому при прохождении частицы космического излучения через два счетчика разряд возникает одновременно в каждом из них. Отличить импульсы, возникающие в счетчиках при прохождении через них частиц космических лучей, от импульсов, возникающих при регистрации излучения радиоактивного фона Земли, можно путем использования устройства, регистрирующего только случаи одновременного возникновения импульсов в двух счетчиках. Такое устройство называют схемой совпадений.

В качестве устройства для выделения импульсов, совпадающих по времени, можно использовать электронный осциллограф. Для этого электрические импульсы с выхода первого счетчика нужно подать на горизонтальные пластины электронно-лучевой трубки осциллографа, а с выхода второго — на вертикальные пластины. При возникновении разряда в первом счетчике происходит смещение луча в вертикальном направлении, регистрация же частицы вторым счетчиком сопровождается смещением луча в горизонтальном направлении. При одновременной регистрации частиц первым и вторым счетчиками должно произойти смещение луча одновременно по горизонтали и по вертикали, в результате чего луч испытывает смещение под углом 45° к горизонтали.

В данной работе производится регистрация частиц космического излучения и обнаруживается зависимость интенсивности потока космического излучения у поверхности Земли от угла, образованного направлением потока с вертикалью. Интенсивность космического излучения у поверхности Земли максимальна в вертикальном направлении и убывает по мере увеличения угла вследствие увеличения толщины слоя атмосферного воздуха.

Порядок выполнения работы

1. Включите электронный осциллограф. Выключите развертку и установите луч в центре экрана трубки.

2. Соедините выход первого счетчика с X-входом осциллографа, а выход второго счетчика с Y-входом (рис. 7.4).

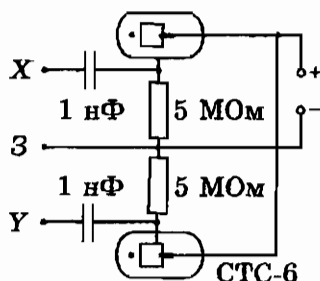


Рис. 7.4

3. Пригласите преподавателя или лаборанта для подключения счетчиков к выпрямителю. Включите выпрямитель и наблюдайте импульсы от счетчиков на экране осциллографа. Регулировкой усилителей горизонтального и вертикального отклонений добейтесь получения одинаковой амплитуды импульсов от первого и второго счетчиков.

4. Установите счетчики один над другим в одной вертикальной плоскости и сосчитайте число совпадений за 5 мин, регистрируя выбросы луча под углом 45° к горизонтали.

5. Установите счетчики один около другого в горизонтальной плоскости и сосчитайте число совпадений за 5 мин. Найдите отношение интенсивностей потока космического излучения в вертикальном и горизонтальном направлении у поверхности Земли.

Вопросы для самопроверки

1. Из каких частиц состоит первичное космическое излучение?
2. Какой состав имеют космические лучи у поверхности Земли?
3. Каким образом в данной работе происходит одновременная регистрация частиц космического излучения?
4. Почему гамма-квант не может быть зарегистрирован одновременно двумя счетчиками?
5. Почему частица космического излучения при прохождении через два счетчика регистрируется каждым из них?

Лабораторная работа № 4

Изучение люминесцентной лампы*

(к главе 6 «Плазма в технике»)

Оборудование: люминесцентная лампа мощностью 15 Вт; лампа накаливания мощностью 100 Вт; индикатор освещенности: школьный фотометр, фотоэлемент с гальванометром или люксметр; линейка.

Содержание и метод выполнения работы

Лампа накаливания превращает в излучение 86% подводимой к ней энергии, однако только 12% из них приходится на видимое человеческим глазом излучение — свет. Этот недостаток лампы накаливания заставил ученых искать новые источники света, более экономичные с точки зрения преобразования электрической энергии в световую. С. И. Вавилов предложил использовать в этих целях явление холодного свечения, называемое люминесценцией.

Одной из важных характеристик источника света, позволяющих сравнивать экономичность различных источников света, является коэффициент световой отдачи K . Этот коэффициент определяется отношением полного светового потока Φ , излучаемого лампой, к полной мощности P , затрачиваемой на питание лампы: $K = \frac{\Phi}{P}$.

Максимальное значение коэффициента световой отдачи, в случае полного преобразования всей затрачиваемой энергии в световую, составляет примерно 200 лм/Вт.

Коэффициент световой отдачи ламп накаливания равен примерно 10 лм/Вт. Коэффициент световой отдачи люминесцентных ламп существенно выше, он может достигать значения 50 лм/Вт.

В быту часто используется люминесцентная лампа, представляющая собой стеклянную трубку, наполненную смесью паров ртути и аргона. В торцы трубки впаяны два электрода, представляющие собой накаливаемые нити. Внутренние стенки трубки покрыты люминесцентным составом. Принципиальная схема включения такой лампы в сеть представлена на рис. 7.5.

* Эта работа поставлена О. Ф. Кабардиным; ее описание приведено в книге: О. Ф. Кабардин, В. А. Орлов, Н. И. Шефер «Лабораторные работы по физике для средних ПТУ» (М.: Высшая школа, 1976, с. 150–154).

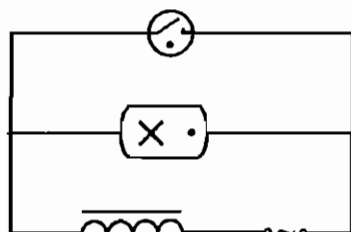


Рис. 7.5

Последовательно с электродами лампы включается дроссель, а параллельно ей — стартер, представляющий собой маленькую разрядную трубку, наполненную неоном. Один из электродов стартера представляет собой биметаллическую пластину. Напряжение зажигания разряда в стартере несколько ниже напряжения сети.

При включении лампы в сеть разряд в ней сразу не возникает, так как напряжение зажигания разряда при холодных электродах около 1000 В. В первый момент разряд возникает между электродами стартера. В результате нагревания током электрического разряда биметаллическая пластина изгибается и касается второго электрода стартера. При этом через электроды лампы пойдет ток от сети и они нагреваются до такой температуры, при которой возникает термоэлектронная эмиссия, т. е. испускание свободных электронов.

Через некоторое время биметаллическая пластина стартера вследствие прекращения разряда в нем охлаждается, распрямляется и размыкает цепь. При размыкании цепи за счет ЭДС самоиндукции на дросселе возникает импульс напряжения, повышающий напряжение на электродах лампы. Этого напряжения оказывается достаточным для зажигания разряда в лампе. В ней возникает низкотемпературная плазма, дающая ультрафиолетовое излучение, которое поглощается люминофорами на стенках трубки и вызывает их люминесценцию. Подобрав специальный состав люминофоров, можно получить свет, по спектральному составу близкий к солнечному.

В работе нужно сравнить коэффициенты световой отдачи люминесцентной лампы K_1 и лампы накаливания K_2 :

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{\Phi_1 P_2}{\Phi_2 P_1}.$$

Электрические мощности ламп известны: $P_1 = 15$ Вт, $P_2 = 100$ Вт. Световые потоки вычисляются по формуле: $\Phi = 4\pi R^2 E$, где E — освещенность, создаваемая лампой на расстоянии R . Если освещенности, создаваемые обеими лампами, будут равны, то искомое отношение коэффициентов световой отдачи будет равно:

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{R_1^2 P_2}{R_2^2 P_1}. \quad (1)$$

Для сравнения освещенностей можно использовать фотометр, фотоэлемент с гальванометром или люксметр.

Порядок выполнения работы

1. Прочитайте § 45 учебника «Физика» для 11 класса школ и классов с углубленным изучением физики (под. ред. А. А. Пинского), в котором рассказывается о фотометрических величинах, характеризующих видимое излучение.

2. Установите лампу накаливания на столе в затемненном помещении и включите ее в сеть.

3. Включите люминесцентную лампу. Для того, чтобы ее можно было считать точечным источником, закройте часть баллона лампы светонепроницаемым чехлом, оставив открытой $1/5$ часть трубки (при этом в расчетах следует использовать $1/5$ часть мощности, т. е. 3 Вт).

4. С помощью индикаторов освещенности (фотометра, фотоэлемента с гальванометром или люксметра) установите источники света на таком расстоянии от индикатора, чтобы освещенности, создаваемые ими, были одинаковы.

5. Измерив расстояния R_1 и R_2 от источников света до индикатора освещенности, рассчитайте по формуле (1) искомое отношение коэффициентов световой отдачи.

Вопросы для самопроверки

1. Каково устройство и принцип действия люминесцентной ртутно-аргоновой лампы?
2. Почему коэффициент световой отдачи люминесцентной лампы больше коэффициента световой отдачи лампы накаливания?
3. Как можно осуществить зажигание люминесцентной лампы без стартера?

Лабораторная работа № 5

Расчет периода электрических колебаний в *RC*-цепи и его экспериментальная проверка

(к главе 6 «Плазма в технике»)

Оборудование: источник постоянного тока с ЭДС $\mathcal{E}$, большей напряжения зажигания неоновой лампы; вольтметр постоянного тока (школьный авометр АВО63 или мультиметр М830В, М832, М838).

Содержание и метод выполнения работы

В технике находят широкое применение релаксационные колебания так называемой пилообразной формы. Графическое изображение таких колебаний дано на рис. 7.6.

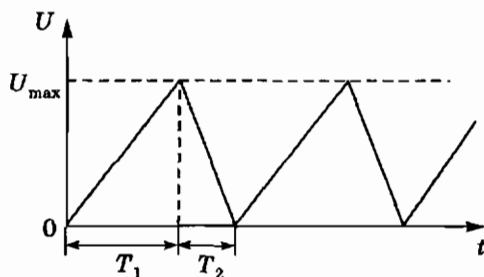


Рис. 7.6

За время T_1 напряжение возрастает по линейному закону от 0 до $U_{\max}$, а затем резко спадает до 0 в течение времени T_2 . Такая зависимость напряжения от времени используется для развертывания осциллограмм в катодных осциллографах.

На рис. 7.7 представлена простейшая схема экспериментальной установки, с помощью которой создаются релаксационные колебания *RC*-типа. К источнику постоянного тока с ЭДС $\mathcal{E}$ подключены резистор сопротивлением R и конденсатор емкостью C . Параллельно конденсатору подключена неоновая лампа H .

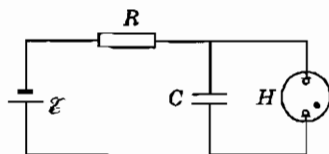


Рис. 7.7

При подключении источника тока конденсатор будет заряжаться через резистор до напряжения зажигания неоновой лампы U_3 . В этот момент лампа начинает проводить ток и конденсатор быстро разряжается через нее. При некотором напряжении U_n (напряжении погасания) разряд в лампе, а следовательно, и разрядка конденсатора прекращаются и начинается снова зарядка конденсатора от источника тока. Получающиеся при этом колебания напряжения на конденсаторе (рис. 7.8) имеют пилообразную форму, отличающуюся несколько от формы графика, приведенного на рис. 7.7.

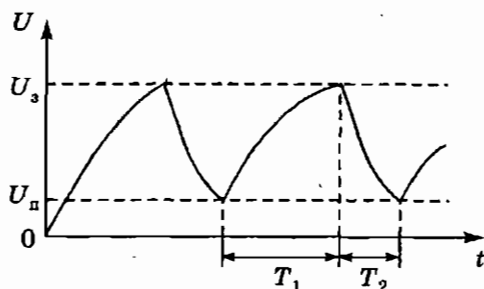


Рис. 7.8

Зарядка конденсатора происходит за время T_1 , а разрядка за время T_2 , причем $T_1 \gg T_2$. Поэтому с большой степенью точности можно записать, что период релаксационных колебаний равен: $T \approx T_1$.

Используя второе правило Кирхгофа, запишем:

$$iR + \frac{1}{C} \int i dt = \mathcal{E}. \quad (1)$$

Решая это уравнение, получим:

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (2)$$

и

$$U_C = \mathcal{E} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right), \quad (3)$$

т. е. напряжение на конденсаторе возрастает по экспоненте.

Запишем выражение (3) для напряжений зажигания и погасания

$$U_{\text{п}} = \mathcal{E} \left(1 - e^{-\frac{t_1}{RC}} \right), \quad (4)$$

$$U_{\text{з}} = \mathcal{E} \left(1 - e^{-\frac{t_2}{RC}} \right). \quad (5)$$

где t_1 и t_2 — соответственно время погасания и время зажигания неоновой лампы.

Из выражений (4), (5) легко получить выражение для периода релаксационных колебаний:

$$T \approx T_1 = RC \ln \frac{\mathcal{E} - U_{\text{п}}}{\mathcal{E} - U_{\text{з}}}.$$

Анализируя его, приходим к следующим выводам:

- период релаксационных колебаний определяется произведением RC . Эта величина носит название постоянной времени RC -цепи. Из выражения (3) видно, что если $t = RC$, то напряжение на конденсаторе $U_C \approx 0,67\mathcal{E}$;
- период релаксационных колебаний определяется также напряжением зажигания и погасания лампы.

В работе нужно проверить полученную формулу для периода релаксационных колебаний и исследовать зависимость этого периода от сопротивления резистора, электрической емкости конденсатора и параметров неоновой лампы.

Вопросы для самопроверки

1. Как возникают электрические колебания в цепи, представленной на рис. 7.7?
2. От каких параметров зависит период релаксационных колебаний в RC -цепи?
3. Как можно изменить период релаксационных колебаний?

8. Методика проведения физико-технической конференции и экскурсий по теме «Плазма на Земле и в космосе»

Весьма полезной формой расширения политехнического кругозора учащихся, активизации их творческой деятельности, популяризации элективных занятий являются **физико-технические конференции**.

Своеобразие этой формы занятий состоит в том, что основную роль на конференции играют сами учащиеся. Естественно, направление и ход конференции зависит от правильного руководства учителя, его научно-технического кругозора и педагогического мастерства.

Подготовка к конференции начинается задолго до ее проведения: составляется план ее проведения, намечаются темы возможных докладов и сообщений, определяется характер опытов, демонстраций, самодельных физических установок.

Учащимся рекомендуется при чтении научной и научно-популярной литературы выделять наиболее ценный материал, делать соответствующие записи, схемы, зарисовки. При подготовке докладов и сообщений желательно уделить внимание проведению небольших исследований (как теоретических, так и практических) и опытов на самодельных физических установках и приборах.

Большую помощь в этой работе учащимся могут оказать учителя физики, математики, химии, астрономии и производственного обучения. Весь этот материал конференции обобщается и систематизируется руководителем элективных занятий.

Перед конференцией следует выпустить стенную газету, в которой должны быть приведены результаты теоретической и практической работы учащихся, краткие описания представленных приборов и их фотографии. Этот материал заменяет обычные тезисы, практикуемые перед конференцией, и вызывает большой интерес учащихся. О дне проведения конференции сообщается заранее, красочно оформляется программа с при-

глашением принять участие в работе конференции всем учащимся старших классов школы.

На конференции учащиеся выступают с докладами и сообщениями теоретического и практического характера более глубокого содержания, чем на семинарах. Эти доклады могут быть насыщены специальными вопросами физики плазмы, в них должны раскрываться физические основы рассматриваемых процессов в плазме, техническое применение, проблемы физики плазмы. Безусловно, предпочтение отдается выступлениям, в которых освещены результаты выполнения лабораторных работ практикума, теоретических и экспериментальных самостоятельных исследований, творческие поиски в создании оригинальных физических установок и приборов.

Очень важно решить, как обеспечить активное восприятие учащимися материалов выступлений, чтобы они не были простыми слушателями, а фактически содокладчиками, готовыми дополнить и исправить выступающих. В ходе конференции ее участники могут осуществлять фотографирование, что позволит затем выпустить фотомонтажи, служащие хорошим средством пропаганды элективных курсов.

Ниже приводим план конференции.

Цели и задачи конференции:

- показать проявление плазменного состояния вещества в природе;
- показать, что плазменное состояние вещества имеет широкое техническое применение сегодня и в будущем;
- расширить кругозор учащихся, способствовать развитию их интереса к физике, выработке стремления к активному познанию окружающего мира;
- воспитать гордость за отечественную науку, внесшую неоценимый вклад в развитие мировой цивилизации.

Ход конференции:

1. Вступительное слово руководителя элективного курса.
2. Доклад «Плазма в природе».
3. Доклад «Физика плазмы — основа технического прогресса».
4. Сообщения учащихся:
 - а) методы получения плазменного состояния вещества;
 - б) магнитогидродинамический генератор: история, сегодняшний день, будущее;

- в) УТС — вчера, сегодня, завтра;
 - г) плазма в доме (электронные линзы, плазменный дисплей);
5. демонстрация физических установок и приборов, изготовленных учащимися.

Экскурсии позволяют учащимся убедиться в научной и практической ценности знаний, способствуют развитию интереса к изучаемому материалу, основным профессиям производства и в этом отношении имеют большое воспитательное значение. Учитывая особенности элективного спецкурса «Плазма — четвертое состояние вещества», целесообразно провести три тематические экскурсии.

Первая экскурсия проводится после изучения темы «Плазма в природе» на метеорологическую станцию для ознакомления с методами исследования ионосферы Земли.

Основной целью второй экскурсии является ознакомление учащихся с исследованием плазмы. Объектами этой экскурсии могут быть лаборатории научно-исследовательских институтов.

Перед проведением экскурсии учитель тщательно продумывает учебные и воспитательные цели, составляет вопросы-задания для учащихся, ответы на которые они должны получить во время экскурсии. Экскурсию проводят совместно учитель и работник института, дающий технические разъяснения, дополняющий объяснения учителя. В вводной части беседы учащиеся получают представления о задачах, технических характеристиках установок. Затем эта часть переходит в основную — завершение проведенной работы в новой ситуации и наблюдение ранее изученных отдельных технических процессов в их комбинации, производственном синтезе. В заключительной части учитель подводит итоги экскурсии, отмечает характер рассмотренных технологических процессов.

Приводим план проведения экскурсии:

1. Вступительное слово работника института.
2. Ознакомление учащихся с производственными методами исследования плазмы.
3. Подведение итогов экскурсии.

Третья экскурсия может быть проведена в обсерваторию для наблюдения космических объектов.

После экскурсий учащиеся представляют письменные отчеты. Эти материалы могут быть использованы на семинарах, конференциях, уроках физики.

Приложение

Задания с выбором ответа

(рекомендуемое время — 1 час)

1. Плазменное состояние вещества — это
 - А) поток электронов;
 - Б) частично или полностью ионизованный газ, в котором плотности положительных и отрицательных частиц равны;
 - В) газ, состоящий из атомов и молекул одного химического элемента;
 - Г) газ, состоящий из атомов и молекул разных химических элементов.
2. Примером плазменного состояния вещества в природе является
 - А) ионосфера Земли;
 - Б) смесь атомов и молекул любых газов;
 - В) туман;
 - Г) лава.
3. Слабоионизованная плазма в природе — это
 - А) молния;
 - Б) горячие межзвездные облака;
 - В) солнечный ветер;
 - Г) плазма солнечного ядра.
4. Высокотемпературная плазма в природе — это
 - А) плазма солнечного ядра;
 - Б) ионосфера Юпитера;
 - В) облака межзвездного газа;
 - Г) радиационный пояс Земли.
5. Ионосфера Земли представляет собой
 - А) часть атмосферы, в которой происходит быстрый рост температуры с высотой;
 - Б) область изменяющегося с высотой состава атмосферы;
 - В) самую верхнюю часть атмосферы Земли;
 - Г) ионизованную часть атмосферы Земли.
6. Причина возникновения полярного сияния — это
 - А) возбуждение атомов и молекул геомагнитным полем;
 - Б) химические реакции в ионосфере Земли;
 - В) действие геомагнитного поля на заряженные частицы в ионосфере Земли;
 - Г) действие падающих метеорных потоков в атмосфере Земли.

7. Состав солнечного ветра определяют по
- А) анализу частиц, движущихся в Солнечной системе;
 - Б) спектральным данным наблюдения Солнца;
 - В) визуальным наблюдениям Солнца;
 - Г) анализу сил, действующих на плазменный хвост кометы.
8. Основными составляющими солнечного ветра являются
- А) только протоны;
 - Б) протоны и электроны;
 - В) только электроны;
 - Г) α -частицы и высокоионизованные ионы.
9. Разделение зарядов в МГД-генераторе происходит под действием силы
- А) Лоренца;
 - Б) Ампера;
 - В) Кулона;
 - Г) тяготения.
10. Термоядерные реакции — это
- А) реакции деления тяжелых ядер;
 - Б) реакции синтеза легких ядер, протекающие при высоких температурах;
 - В) реакции синтеза легких ядер, протекающие при любых температурах;
 - Г) реакции деления любых ядер.
11. Устройство для получения энергии за счет реакции синтеза легких атомных ядер называется
- А) циклотроном;
 - Б) масс-спектрографом;
 - В) МГД-генератором;
 - Г) термоядерным реактором.
12. Для осуществления управляемого термоядерного синтеза необходимо осуществление реакции
- А) $^{27}\text{Al} + \alpha \rightarrow ^{30}\text{Si} + p$;
 - Б) $^{238}\text{U} + n \rightarrow ^{239}\text{Pu}$;
 - В) $^{14}\text{N} + \alpha \rightarrow ^{17}\text{O} + p$;
 - Г) $^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + n$.

Ответы на задания приведены в таблице:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Код ответа	Б	А	В	А	Г	В	А	Б	А	Б	Г	Г

Учебное издание

Орлов Владимир Алексеевич
Дорожкин Сергей Владимирович

ПЛАЗМА — ЧЕТВЕРТОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА
Элективный курс
Методическое пособие

Ведущий редактор *В. Обмнина*
Художник *Ф. Инфантэ*
Художественный редактор *О. Лапко*
Технический редактор *Т. Блётцева*
Корректор *Н. Савельева*
Компьютерная верстка *В. Носенко*

Подписано в печать 22.11.04. Формат 60×90 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 9,0. Тираж 3000 экз. Заказ 3772

Издательство «БИНOM. Лаборатория знаний»
Адрес для переписки: Москва, 119071, а/я 32
Телефон (095)955-0398. E-mail: lbz@aha.ru
<http://www.lbz.ru>

Отпечатано с готовых диапозитивов
в полиграфической фирме «Полиграфист».
160001, г. Вологда, ул. Челюскинцев, 3.

Победитель конкурса по созданию учебной литературы
нового поколения для средней школы,
проводимого НФПК - Национальным фондом подготовки кадров
и Министерством образования Российской Федерации

ISBN 5-94774-149-0



9 785947 741490