

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

ФИЗИКА

А. Е. Айзензон

УЧЕБНИК и ПРАКТИКУМ



УМО СПО рекомендует

 ЮРАЙТ
ИЗДАТЕЛЬСТВО
www.yurait.by

А. Е. Айзензон

ФИЗИКА

УЧЕБНИК И ПРАКТИКУМ ДЛЯ СПО

Рекомендовано Учебно–методическим отделом среднего профессионального образования в качестве учебника и практикума для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования

**Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru**

Москва ■ Юрайт ■ 2018

УДК 53(075.32)

ББК 22.3я723

A37

Автор:

Айзенцон Александр Ефимович — профессор, доктор педагогических наук, кандидат технических наук, профессор кафедры физики и химии Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, лауреат премии Министра обороны Российской Федерации.

Рецензенты:

Ильин В. А. — профессор, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей и экспериментальной физики Московского педагогического государственного университета;

Чиркин М. В. — доктор физико-математических наук, профессор, завдующий кафедрой электронных приборов Рязанского государственного радиотехнического университета.

Айзенцон, А. Е.

A37 **Физика : учебник и практикум для СПО / А. Е. Айзенцон. — М. : Издательство Юрайт, 2018. — 335 с. — Серия : Профессиональное образование.**

ISBN 978-5-534-00795-4

Учебник написан емко, изложение теории доступно для студентов всех технических направлений. Он формирует целостное представление о физике как о базовой современной науке. В издании много практических примеров, большинство которых раскрывает натурные реализации физических процессов в различной технике и военном деле, что будет особенно интересно как студентам, так и преподавателям.

Книга написана живым, доступным языком с применением приемов развивающего и проблемного обучения: диалоговый характер изложения, вопросы и мини-задачи по его ходу, мотивирующие примеры из практики, гуманитарные включения и т. д. Каждая глава заканчивается профессионально направленными неформальными вопросами для самоконтроля и задачами с примерами их решения.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования и профессиональным требованиям.

Для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования, обучающихся по техническим и военным специальностям.

УДК 53(075.32)

ББК 22.3я723



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

ISBN 978-5-534-00795-4

© Айзенцон А. Е., 2016

© ООО «Издательство Юрайт», 2018

Оглавление

Введение.....	7
---------------	---

Раздел I

МЕХАНИКА, МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Глава 1. Кинематика и динамика материальной точки.....	13
1.1. Кинематика материальной точки	13
1.2. Релятивистская кинематика	19
1.3. Динамика материальной точки.....	24
1.4. Виды сил	27
1.4.1. Силы упругости.....	27
1.4.2. Сила трения	29
1.4.3. Сила тяготения	31
1.4.4. Силы инерции.....	33
Резюме.....	34
<i>Вопросы для самоконтроля.....</i>	<i>35</i>
<i>Задачи с решениями.....</i>	<i>35</i>
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	<i>39</i>
Глава 2. Работа и энергия	40
2.1. Работа и энергия	40
2.2. Потенциальная энергия.....	43
2.3. Система частиц	46
2.4. Закон сохранения механической энергии	47
2.5. Закон сохранения импульса	50
2.6. Удар	54
2.7. Релятивистская динамика	57
Резюме.....	58
<i>Вопросы для самоконтроля.....</i>	<i>59</i>
<i>Задачи с решениями.....</i>	<i>59</i>
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	<i>61</i>
Глава 3. Вращательное движение	62
3.1. Кинематика вращательного движения	62
3.2. Динамика вращательного движения тела.....	65
3.3. Момент импульса	69
3.4. Закон сохранения момента импульса	73
Резюме.....	75
<i>Вопросы для самоконтроля.....</i>	<i>75</i>
<i>Задачи с решениями.....</i>	<i>75</i>
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	<i>77</i>

Глава 4. Молекулярная физика и термодинамика	78
4.1. Принципы классической статистики	78
4.2. Давление и температура	81
4.3. Распределение Максвелла и Больцмана	83
4.4. Процессы переноса.....	87
4.5. Турбулентности.....	91
4.6. Первый закон термодинамики	93
4.7. Изопроцессы и цикл Карно.....	97
4.8. Второй закон термодинамики и реальные машины.....	99
4.9. Агрегатные состояния вещества	104
Резюме	107
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	107
<i>Задачи с решениями</i>	107
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	109

Раздел II ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Глава 5. Электростатика и постоянный ток	113
5.1. Электростатическое поле.....	113
5.2. Теорема Гаусса для электрического поля.....	116
5.3. Потенциал электростатического поля	118
5.4. Поле внутри и вне проводника.....	120
5.5. Конденсаторы и энергия электростатического поля.....	122
5.6. Диэлектрики в электростатическом поле.....	124
5.7. Постоянный ток	127
5.8. Законы Ома и Джоуля — Ленца для полной цепи.....	129
5.9. Газовый разряд и плазма	131
Резюме	133
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	133
<i>Задачи с решениями</i>	133
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	135
Глава 6. Электромагнетизм	136
6.1. Магнитное поле. Закон Био — Савара — Лапласа	136
6.2. Теорема Гаусса и циркуляция вектора \mathbf{B}	138
6.3. Сила Лоренца.....	139
6.4. Сила Ампера.....	143
6.5. Магнитное поле в веществе	146
6.6. Явление электромагнитной индукции.....	151
6.7. Вихревое электрическое поле	153
6.8. Самоиндукция и взаимная индукция	155
6.9. Уравнения Максвелла	160
Резюме.....	163
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	163
<i>Задачи с решениями</i>	164
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	166

Раздел III КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Глава 7. Колебания и волны	169
7.1. Гармонические колебания	169

7.2. Физический маятник	172
7.3. Колебательный контур	173
7.4. Затухающие колебания	175
7.5. Вынужденные механические колебания	177
7.6. Вынужденные электромагнитные колебания	181
7.7. Кинематика волновых процессов	184
7.8. Электромагнитные волны	187
7.9. Эффект Доплера	190
7.10. Волна как носитель информации	192
Резюме	196
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	196
<i>Задачи с решениями</i>	196
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	199
Глава 8. Волновая оптика	200
8.1. Когерентные волны	200
8.2. Интерферометр Юнга	202
8.3. Интерференция при отражении	203
8.4. Дифракция волн	206
8.5. Геометрическая оптика	211
8.6. Поглощение и рассеяние волн	215
8.7. Дисперсия волн	217
8.8. Поляризация волн	218
Резюме	222
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	222
<i>Задачи с решениями</i>	223
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	225
Раздел IV	
КВАНТОВАЯ ФИЗИКА	
Глава 9. Корпускулярно-волновой дуализм	229
9.1. Тепловое излучение	229
9.2. Квантовая природа света	234
9.3. Внешний фотоэффект	235
9.4. Эффект Комптона	239
9.5. Волны де Бройля и волновая функция. Уравнение Шредингера	241
9.6. Единство «волна — частица»	242
9.7. Соотношение неопределенностей	244
9.8. Квантовая теория водородоподобного атома	245
9.9. Гармонический осциллятор	248
9.10. Квантовая теория многоэлектронных атомов	250
Резюме	253
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	253
<i>Задачи с решениями</i>	253
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	255
Глава 10. Элементы физики твердого тела	256
10.1. Излучение атомов. Лазер	256
10.2. Физические основы применения лазера	259
10.3. Квантовая теория молекул	262
10.4. Квантовая теория электропроводности	264
10.5. Зонная теория	266

10.6. Эмиссия электронов.....	268
10.7. Собственная проводимость полупроводников.....	271
10.8. Примесная проводимость полупроводников.....	273
10.9. Электронно-дырочный переход.....	275
10.10. Транзистор.....	281
Резюме.....	284
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	284
<i>Задачи с решениями</i>	285
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	287
Глава 11. Атомное ядро и элементарные частицы	288
11.1. Строение атомного ядра.....	288
11.2. Радиоактивность.....	292
11.3. Реакция деления.....	294
11.4. Физические основы ядерной энергетики.....	296
11.5. Физические основы ядерного оружия.....	298
11.6. Физические основы поражающих факторов ядерного взрыва.....	301
11.7. Физические принципы оценки действия радиоактивного излучения.....	302
Резюме.....	304
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	305
<i>Задачи с решениями</i>	305
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	307
Глава 12. Физическая картина мира	308
12.1. Микро- и макромир.....	308
12.2. Базис физической картины мира.....	310
12.3. Теоретическое мышление.....	312
12.4. Объединение разрозненного.....	315
12.5. Расширение поля зрения.....	316
12.6. Преодоление инерции понятий.....	317
12.7. Самоорганизация.....	319
12.8. Эволюция материи.....	321
12.9. Работа с непредставимым.....	324
12.10. Систематизация объектов физической картины мира.....	326
12.11. Человек в физической картине мира.....	328
Резюме.....	330
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	330
<i>Темы реферативных работ</i>	331
Литература	332
Новые издания по дисциплине «Физика» и смежным дисциплинам	333
Ответы	335

Введение

Физика — это не только ее законы, но и их воплощение в технике, в частности в вооружении и военной технике (ВВТ). Изучение физики в отрыве от сфер ее применения не соответствует задачам целостного образования.

И наоборот: изучение технических систем на уровне принципов и законов их действия — это продолжение изучения физики. Физический эксперимент, открывающий неизвестное, осуществляют несколько раз. При этом он отягощен разного рода вспомогательными, измерительными и индикаторными устройствами. В то же время техника, основанная на его результатах, уже освобождена от всего лишнего и предназначена для *многократного* использования. В сущности, всякое техническое устройство есть реализация физического эксперимента в социальном варианте.

Тот же автомобиль — это воплощенная, прикладная физика. Прособразование поступательного движения поршней в цилиндрах двигателя во вращение колес — это реализация закономерностей, изучаемых в разделе физики «Механика». Движение поршней — это следствие расширения газов, изучаемого в разделах «Молекулярная физика» и «Термодинамика». Расширение газов — это результат горения топлива, которое инициирует искра в свече зажигания. Она образуется в результате электромагнитных явлений, изучаемых в разделе «Электромагнетизм».

Поршни в цилиндрах, кузов, узлы двигателя и подвески испытывают механические колебания, которые передаются от одной точки к другой в виде *упругих* волн, а свет фар и приборной панели и радиоприем относятся к *электромагнитным* волнам, изучаемым в разделе «Колебания и волны». Электромагнитные процессы в системе зажигания и электромагнитные волны формируют с помощью полупроводниковых устройств, которые основаны на явлениях, изучаемых в разделе «Квантовая физика». Физическую базу легко усмотреть и в любом другом техническом устройстве, в том числе военном, — стрелковом и лазерном оружии, компьютерных системах, ракетах, системах наведения, защиты, связи, маскировки и т.д. Военно-промышленные системы не только стоят первыми в очереди по внедрению научно-технической мысли, но и активно ее стимулируют. Яркий исторический пример — разработка ядерного оружия во время и после Второй мировой войны.

Со времен глубокой древности опасность для человека представляли не только некоторые явления природы, но и другие люди. Сосуществовать с природой человек более или менее научился (иной раз и в ущерб себе), но внутривидовое противостояние не исчезло. Поэтому человек издревле изобретал, с одной стороны, оружие, а с другой — защиту от него. Соревнование средств нападения и защиты пронизывает всю историю человечества.

ва, а с появлением физики военное дело обрело прочную научно-техническую базу и множество векторов развития. При любом отношении к силовой составляющей цивилизации это данность, без которой не обходится ни одно государство, а исследования, осуществляемые в рамках военно-промышленного комплекса (ВПК), зачастую служат двигателем научно-технического прогресса.

При этом наука развивается и независимо от силовой направленности, а *военные* научно-технические разработки по прошествии стадии секретности широко внедряются в народное хозяйство, например Интернет, смартфон, реактивный пассажирский лайнер и многое другое. Поэтому обучение физике востребовано не только военно-промышленным комплексом, но и гражданскими заказчиками. Такое обучение формирует особый вид научно-технического мышления, оперирующего фундаментальными знаниями и навыками. Он отличается от бытового, гуманитарного, художественного и других.

Учебники физики различаются не только ориентацией на те или иные учебные программы, но и содержанием, объемом и глубиной изложения учебного материала. Поэтому современная тенденция непрерывного образования требует перехода от одного учебника к другому.

Настоящий учебник в какой-то степени сглаживает такой переход, поскольку его содержание и шире, и глубже минимума, необходимого для реализации программ по физике учреждений среднего профессионального образования. Более сложные компоненты учебника адресованы тем вдумчивым и мотивированным студентам, для которых учение не формальность, а средство *непрерывного* профессионального роста. Эти уровни учебника структурно не разделены — каждый студент может сам или с помощью преподавателя оценить свою планку сложности и сдвигать ее по мере освоения курса.

Данный учебник предназначен, прежде всего, для образовательных учреждений СПО с технической направленностью обучения, которые готовят электронщиков, механиков, строителей, технологов, связистов и т.д. Однако он рассчитан и на более широкий спектр профессий, поскольку физика — это универсальная база не только всякой техники, но и мировоззрения. Она организует и структурирует ум, который нужен в *любой* деятельности.

Изложение курса физики в данном учебнике сопровождается многочисленными и разнообразными примерами ее значимости в различных устройствах и процессах. Это способствует формированию особого стиля мышления и научного взгляда на мир природы и социума. Техника, технологии, космос, исследования структур неорганической и органической материи, экология, коммуникация, вооружения и многое другое основаны на средствах и методах физики, влияющих на научно-технический прогресс и саму историю человечества.

В результате изучения дисциплины учащийся должен освоить:

трудовые действия

- владение навыками оперирования понятиями, методами и законами физики при решении военно-технических задач, сформулированных как физические;

- владение навыками привлечения физических констант, справочных данных, оценки порядка величин и опоры на их размерности при решении физических задач;

необходимые умения

- распознавать, вычленять и анализировать физическую сущность явлений и процессов в изучаемых объектах природы и техники;
- формулировать изучаемую военно-техническую задачу как физическую;
- применять для решения изучаемых задач основные модели, методы и законы физики;

необходимые знания

- особенности развития эмпирических и теоретических оснований, представлений, понятий и законов физики, имеющих научно-практическое и мировоззренческое значение;

- физические явления, принципы и законы, используемые при конструировании и эксплуатации изучаемых объектов техники и вооружения;

- возможности и особенности применения физических моделей, методов и законов при исследовании объектов природы, техники и вооружения.

Раздел I

**МЕХАНИКА,
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА
И ТЕРМОДИНАМИКА**



Глава 1

КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

Абсолютным может быть только сомнение в нем¹.

В результате изучения данной главы учащийся должен:

знать

- предмет, цели, основные понятия, модели, положения и законы кинематики и динамики материальной точки, их эмпирические и теоретические основания;
- принцип относительности и преобразования Галилея и Лоренца;
- основы релятивистской механики и ее роль в мировоззрении;
- характеристики механического движения и действующих в механике сил, существенные для конструирования и эксплуатации изучаемых объектов техники и вооружения;

уметь

- распознавать, вычленять и анализировать проявления механики материальной точки в изучаемых объектах природы и техники;
- формулировать военно-техническую проблему как физическую задачу механики материальной точки и применять аппарат теории для ее решения;

владеть

- навыками оперирования понятиями, методами и законами механики материальной точки при решении военно-технических задач, сформулированных как физические;
 - навыками привлечения физических констант, справочных данных, оценки порядка величин и опоры на их размерности при решении задач механики материальной точки.
-

1.1. Кинематика материальной точки

Анализ перемещений физических объектов зависит от решаемых задач. *Кинематика* изучает механическое движение, отвлекаясь от его причин. Простейший объект кинематики — материальная точка. Это одна из *идеальных моделей*, которые широко используют в физике, чтобы упростить первичное описание явлений.

Материальная точка (частица) есть тело, размерами которого при рассмотрении данного явления можно пренебречь.

При всей огромности Земли (радиус $\sim 6,4 \cdot 10^3$ км) ее среднее расстояние до Солнца таково ($\sim 1,5 \cdot 10^8$ км), что Землю можно считать материальной точкой. Если же нас интересуют причины смены дня и ночи или времен года, то описание ее движения к перемещению материальной точки не сводится.

Понятие «движение» также требует уточнений.

¹ В качестве эпиграфа к каждой главе приводится авторский афоризм.

ВОПРОС. Двигаетесь ли вы, стоя на автобусной остановке?

ОТВЕТ. На первый взгляд, выделенные слова друг другу противоречат, но, на взгляд водителя проезжающего мимо автомобиля, вы сначала приближаетесь к нему, а затем удаляетесь, а относительно центра Земли вы двигаетесь по окружности. Это типичное проявление *относительности* движения, характеристики которого определяются системой отсчета.

Система отсчета — совокупность тела отсчета, системы координат и часов.

От способности переходить из одной системы отсчета в другую зависит не только решение различных задач, но и физическая картина мира (см. гл. 12).

Исторический экскурс

Птолемей (ок. 100 — ок. 170)¹ и его последователи были не в состоянии выйти из системы отсчета, связанной с Землей, полагая, что она центр Вселенной. Такой переход удалось осуществить лишь через много веков польскому астроному, служителю церкви Н. Копернику (1473—1543) и поддерживавшему идею гелиоцентрической системы итальянскому профессору Г. Галилею (1564—1642), от которого ведут отсчет физики как науки. Церковь заставила пожилого профессора на коленях отречься от своих взглядов, но его слова «А все-таки она вертится!» стали символом борьбы пылливой мысли и агрессивного невежества. Только в 1992 г. Церковь сняла с Галилея обвинение в ереси. Тем самым была признана ошибка и в отношении итальянского мыслителя Джордано Бруно (1548—1600), которого сожгли на площади Цветов в Риме. В этом контексте уместно вспомнить и немецкого астронома И. Кеплера (1571—1630), который на недоверие всемогущей Церкви реагировал примерно так: «Я могу подождать своего читателя еще сто лет, ведь Бог ждал шесть тысяч лет!»

Начало системы координат чаще всего совмещают с телом отсчета. В одномерной системе достаточно одной координаты. Например, положение пули в стволе при выстреле однозначно определяется ее расстоянием от затвора. В двумерной системе нужны две координаты, например положение населенного пункта на карте определяется широтой и долготой местности, а в трехмерной системе координат нужны уже три числа.

ВОПРОС. Как находят положение объекта в системах GPS, ГЛОНАСС, «Галилео»?

ОТВЕТ. По расстоянию как минимум от трех спутников (четвертый спутник синхронизирует их сигналы).

Положение частицы, например, в точке C (рис. 1.1) можно определить декартовыми координатами x_C, y_C, z_C или **радиус-вектором** \mathbf{r}_C ². Его модуль определяет расстояние частицы от начала координат O , а его направление можно задать углами α и φ , подобно тому как это делают при определении положения воздушной цели (азимут и угол места). Если частица переместилась из точки C в точку M , то изменение ее положения характеризуют перемещением.

¹ «Привязка» ученых ко времени осуществляется в учебнике либо датами жизни, либо временем открытия.

² Здесь и далее векторные величины обозначены прямым жирным шрифтом.

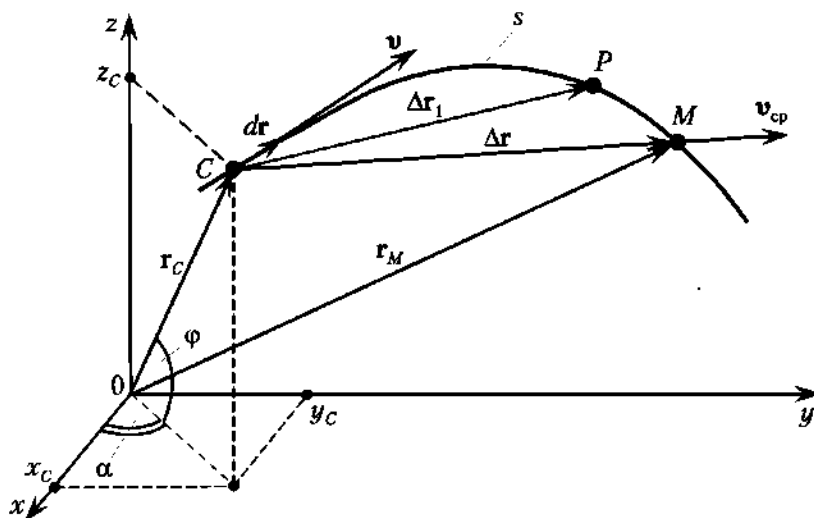


Рис. 1.1

Перемещение — это приращение радиус-вектора частицы:

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_M - \mathbf{r}_C \quad (1.1)$$

Между точками C и M частица занимает промежуточные положения.

Воображаемая (иногда и видимая) линия, соединяющая положения, последовательно занимаемые частицей в пространстве, называется **траекторией**. Расстояние, пройденное частицей вдоль траектории, определяет ее **путь**.

Понятие материальной точки может быть применимо и к одному из видов движения относительно крупных тел.

Движение, при котором все точки тела описывают одинаковые траектории, называется **поступательным**.

Если при прямолинейном однонаправленном движении путь s равен модулю перемещения Δr , то при **криволинейном** движении (см. рис. 1.1) путь больше перемещения, так как длина дуги больше ее хорды. Чем меньше перемещение, тем ближе хорда к дуге.

Любое перемещение Δr требует времени Δt .

Перемещение частицы в единицу времени определяет ее **среднюю скорость**:

$$\mathbf{v}_{\text{cp}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1.2)$$

Поскольку в правой части равенства — **вектор** $\Delta \mathbf{r}$, то и в левой — **вектор** \mathbf{v}_{cp} , сонаправленный с $\Delta \mathbf{r}$. Средняя скорость — весьма грубая характеристика движения.

Пример 1.1. Пусть автомобиль за время Δt проехал от Смоленска (точка C на рис. 1.1) до Москвы (точка M) через Ржев (точка P). Очевидно, что формула (1.2) не отражает его скорости в пределах Смоленска или какой-либо улицы Ржева. Это яркий пример того, что получаемый результат зависит от условий наблюдения, в данном случае — от его длительности.

При $\Delta t \rightarrow 0$, т.е. «в краткое мгновение», $\Delta r \rightarrow dr$, и формула (1.2) принимает вид

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1.3)$$

т.е. **мгновенная скорость** есть производная перемещения по времени.

Направление вектора \mathbf{v} очевидно из рис. 1.1: по касательной к траектории в данной ее точке. Например, искры при заточке резца летят по касательной к окружности точильного камня.

Как и всякий вектор, вектор \mathbf{v} может быть спроецирован на любое направление, выбор которого зависит от условий конкретной задачи.

Модуль мгновенной скорости определяется модулем бесконечно малого перемещения $dr = ds$:

$$v = \frac{dr}{dt} = \frac{ds}{dt}. \quad (1.4)$$

Производная функции $s(t)$ зависит от ее вида. При $s = Ct^3$ получаем $v = 3Ct^2$.

Пусть тело равномерно движется вдоль одной координаты. Тогда $s = r - r_0 = Ct$, где r_0 — модуль радиус-вектора частицы при $t = 0$ (рис. 1.2, а). Отсюда

$$r = r_0 + Ct. \quad (1.5)$$

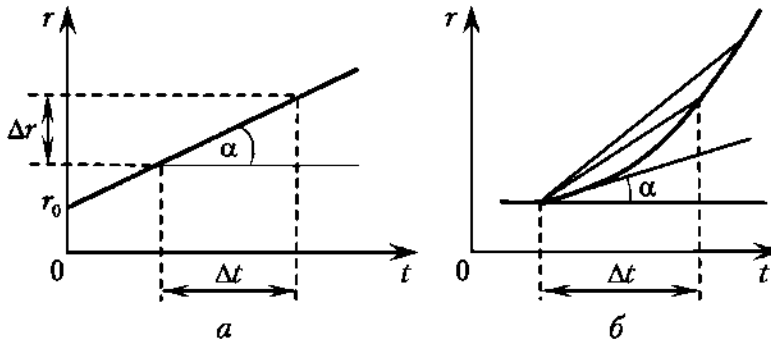


Рис. 1.2

ВОПРОС. Каков смысл коэффициента C ?

ОТВЕТ. Взяв производную по времени и учитывая формулу (1.4), получим $dr/dt = C = v$, т.е. формула (1.5) принимает вид

$$r = r_0 + vt. \quad (1.6)$$

Пример 1.2. Пользуясь рис. 1.2, а, определим графический смысл модуля скорости.

Решение. Из формулы (1.2) и рис. 1.2, а следует, что $v_{\text{ср}}$ численно равна $\text{tg } \alpha$. При произвольной траектории (рис. 1.2, б) с уменьшением Δt Δr сливается с касательной к траектории, т.е. $dr \rightarrow ds$. При этом мгновенная скорость $v = dr/dt$ численно равна тангенсу наклона касательной к траектории в данной точке.

Изменение скорости во времени характеризуют ускорением.

Средним ускорением называют приращение скорости за единицу времени:

$$\mathbf{a}_{\text{ср}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}.$$

Устремляя Δt к нулю, получим

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}, \quad (1.7)$$

т.е. **мгновенное ускорение** есть производная скорости по времени.

Поскольку скорость — вектор, изменяться могут и модуль, и направление. Для удобства анализа представим их отдельно: $\mathbf{v} = v\boldsymbol{\tau}$, где $\boldsymbol{\tau}$ — вектор *единичной длины*, имеющий направление вектора \mathbf{v} . Тогда формула (1.7) становится производной произведения:

$$\mathbf{a} = \frac{dv}{dt}\boldsymbol{\tau} + v\frac{d\boldsymbol{\tau}}{dt}. \quad (1.8)$$

Первый вектор правой части параллелен вектору $\boldsymbol{\tau}$ — по касательной к траектории. Его называют *тангенциальным ускорением*.

Тангенциальное ускорение a_t определяет изменение модуля скорости и направлено по касательной к траектории.

При $dv/dt > 0$ вектор \mathbf{a}_t сонаправлен с вектором $\boldsymbol{\tau}$ (рис. 1.3, а), а при $dv/dt < 0$ антипараллелен ему. Если скорость изменяется *линейно*: $v = v_0 + Bt$, то $dv/dt = B = a_t$ и

$$v = v_0 + a_t t. \quad (1.9)$$

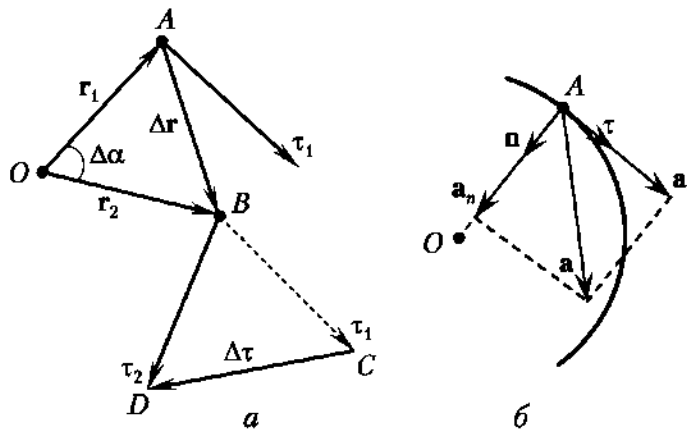


Рис. 1.3

При $a_t > 0$ движение *равноускоренное*, а при $a_t < 0$ — *равнозамедленное*. Вектор \mathbf{a}_t — это то *линейное* ускорение, ради которого создают двигатели, пороховые заряды и т.д.

Второй вектор правой части равенства (1.8) характеризует изменение вектора $\boldsymbol{\tau}$. Поскольку он имеет единичный модуль, оно возможно только в отношении его *направления* при *криволинейной* траектории частицы. Всякий ее малый участок можно рассматривать как *дугу окружности*, центр O которой называют *центром кривизны* (см. рис. 1.3, а). Приращение $\Delta\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_2 - \boldsymbol{\tau}_1$ легко получить путем совмещения начал этих векторов в точках B и A траектории. Поскольку треугольники $B CD$ и $O A B$ подобны, $\Delta\boldsymbol{\tau}/\boldsymbol{\tau} = \Delta r/r$, т.е. $\Delta\boldsymbol{\tau} = \Delta r/r$, так как $\boldsymbol{\tau} = 1$. Разделив обе части этого равенства на Δt , получим $\Delta\boldsymbol{\tau}/\Delta t = \Delta r/(r\Delta t)$, а при $\Delta t \rightarrow 0$ получаем

$$\frac{d\boldsymbol{\tau}}{dt} = \frac{1}{r} \frac{dr}{dt} = \frac{v}{r},$$

где учтено соотношение (1.4). Таким образом, модуль второго вектора в правой части формулы (1.8) принимает вид v^2/r , а его направление совпадает с направлением вектора $d\boldsymbol{\tau}$.

ВОПРОС. Каково направление вектора $d\tau$?

ОТВЕТ. Направление можно получить двумя способами.

1. Как и всякий вектор, $d\tau$ можно разложить на составляющие. Если предположить, что одна из них параллельна вектору τ , то она изменяла бы его *модуль*, что невозможно по определению. Следовательно, вектор $d\tau$ может быть только *ортогонален* вектору τ (вектору \mathbf{v}), т.е. он направлен по радиусу к *центру* O кривизны траектории. Это направление характеризуют единичным вектором \mathbf{n} (рис. 1.3, б).

2. Как следует из рис 1.3, а, при $\Delta t \rightarrow 0, B \rightarrow A, \Delta \tau \rightarrow d\tau$.

Нормальное (центростремительное) ускорение направлено к центру кривизны траектории (см. рис. 1.3, б) и определяется выражением

$$\mathbf{a}_n = \frac{v^2}{r} \mathbf{n}. \quad (1.10)$$

Полное ускорение \mathbf{a} есть сумма тангенциального и нормального ускорений:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_\tau + \mathbf{a}_n. \quad (1.11)$$

Направление вектора полного ускорения находится в пределах угла $\pi/2$ между направлениями \mathbf{a}_τ и \mathbf{a}_n и зависит от соотношения их модулей. Его модуль равен

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}. \quad (1.12)$$

Выражения (1.4), (1.7), (1.11) обеспечивают решение множества задач кинематики, но существует также класс обратных задач: как по зависимости $v(t)$ определить пройденный путь или по зависимости $a(t)$ найти скорость?

Как следует из формулы (1.6), при $v = v_c = \text{const}$ $\Delta r = \Delta s = v\Delta t$, т.е. путь равен площади, заштрихованной на рис. 1.4, а. Этот *графический смысл* Δs позволяет определять путь и при других видах движения. Например, линейную зависимость $v(t)$ (равноускоренное движение) можно приближенно представить в виде ломаной линии (рис. 1.4, б). Это предполагает, что в течение малого Δt_i $v_i = \text{const}$, затем скачком меняется до v_{i+1} и т.д. Тогда путь, пройденный в интервале $0-t$, определяется суммой площадей таких прямоугольников:

$$s \approx \sum_{i=1}^N \Delta s_i = \sum_{i=1}^N v_i \Delta t_i. \quad (1.13)$$

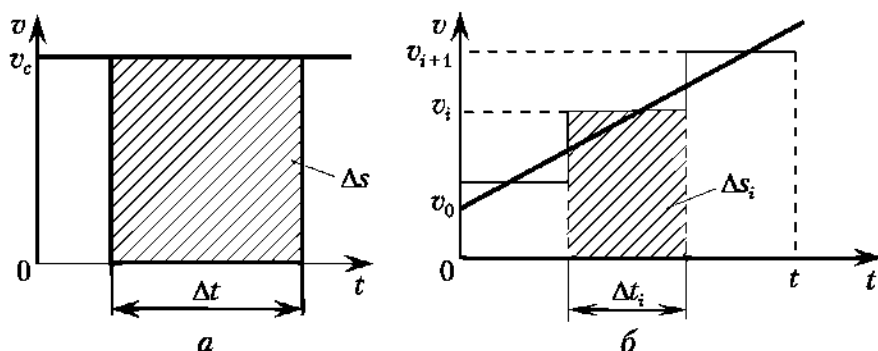


Рис. 1.4

Чем меньше Δt , тем ближе ломаная к прямой, а выражение (1.13) ближе к площади трапеции Ov_0vt (см. рис. 1.4, б): $s = (v_0 + v)t/2$. Подставляя v из выражения (1.9), получаем известную формулу

$$s = v_0t + \frac{at^2}{2}. \quad (1.14)$$

Ее можно получить не только более точным, но и универсальным способом, позволяющим определять путь при разных $v(t)$. При переходах $\Delta t \rightarrow dt$, $\Delta s \rightarrow ds$ операция суммирования в формуле (1.13) превращается в операцию *интегрирования*:

$$\int_0^s ds = \int_0^t v dt. \quad (1.15)$$

Здесь знак интеграла \int заменяет знак суммы \sum , а обозначения под и над знаком интеграла указывают, в каких пределах изменяется подынтегральная переменная. Как следует из формулы (1.15), путь зависит от вида подынтегральной функции $v(t)$. Если, в частности, она имеет вид (1.9), то в результате интегрирования получаем формулу (1.14).

Аналогичным образом решается задача определения скорости v по известной зависимости $a(t)$. Поскольку из соотношения (1.7) следует равенство $dv = a dt$, то

$$\int_0^v dv = \int_0^t a dt. \quad (1.16)$$

При равноускоренном движении $a = \text{const}$. Поэтому из формулы (1.16) следует

$$v = v_0 + at. \quad (1.17)$$

1.2. Релятивистская кинематика

Операцию стыковки грузового корабля с космической станцией контролируют в системах отсчета «Земля» и «станция», в которых корабль имеет разные координаты и скорости. То же относится к дозаправке самолетов в воздухе, стрельбе с движущегося транспорта и т.д. Это относится ко многим практически важным задачам, где нужно переходить из одной системы отсчета в другую.

Пусть имеются системы отсчета O и O' (рис. 1.5), причем тело отсчета O' движется в системе O поступательно с постоянной скоростью \mathbf{v} . Для произвольной частицы A

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}' + \mathbf{r}_0. \quad (1.18)$$

Дифференцируя формулу (1.18) по времени, получаем

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}' + \mathbf{v}, \quad (1.19)$$

где \mathbf{u} — скорость частицы A в системе O ; \mathbf{u}' — ее скорость в системе O' ; \mathbf{v} — скорость системы O' относительно системы O . Если десантник выпрыгивает из движущегося транспорта, то он интуитивно отталкивается так, чтобы уменьшить свою скорость \mathbf{u} относительно поверхности Земли.

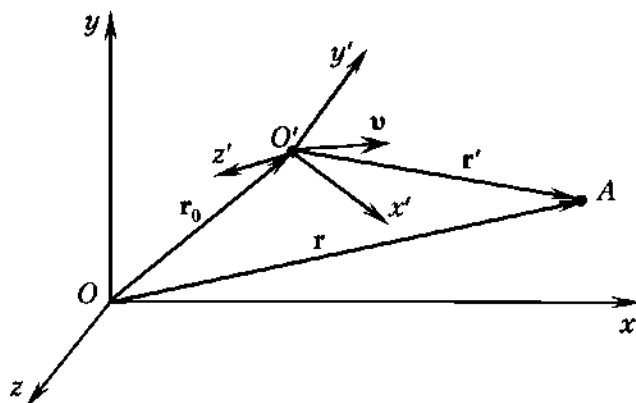


Рис. 1.5

Равенства (1.18), (1.19) называются **преобразованиями Галилея**. При всей их полезности они, однако, не позволяют наблюдателю определить факт своего движения относительно системы O , если он полностью изолирован внутри системы O' . То же относится и к наблюдателю, изолированному в системе O , движущейся относительно системы O' со скоростью $-v$. Это вызывает вопрос: какая же из систем движется действительно? Поскольку по скоростям (1.19) определить это невозможно, воспользуемся *ускорением*, дифференцируя формулу (1.19) по времени. Так как $v = \text{const}$, получаем

$$a = a'. \quad (1.20)$$

Попытка не удалась: ускорения тел в системах O и O' равны. Отсюда следует **принцип относительности Галилея**: никакими измерениями кинематических характеристик движения тел нельзя определить, движется данная система отсчета равномерно и прямолинейно или покоится.

В обоих случаях скорость системы остается постоянной, и такие системы отсчета называют **инерциальными**.

Преобразования Галилея оказались бессильны и при измерении скорости света.

Исторический экскурс

Скорость света была впервые измерена датским астрономом О. Ремером в 1676 г. Он воспользовался тем, что за время обращения одного из спутников Юпитера (~42 ч) расстояние между ним и Землей возрастает из-за орбитального движения Земли вокруг Солнца. Поскольку на преодоление дополнительного расстояния свету требуется время, период затмения спутника также возрастает.

В конце XIX в. американские физики А. Майкельсон (1852–1931, Нобелевская премия 1907 г.) и Э. Морли (1830–1923) уточняли значение скорости света, исходя из предположения, что свет — это волны эфира. Они сопоставили ее *по* направлению орбитального движения Земли вокруг Солнца (скорость ~30 км/с) и *поперек* этого направления. Как говорил Майкельсон, это похоже на соревнование пловцов, один из которых плывет против эфирного ветра, а потом по его течению, а второй — туда и обратно поперек течения. Однако вопреки формуле (1.19) скорость света не зависела ни от времени года, ни от того, в каком направлении измеряется. Это удивительное обстоятельство вместе с некоторыми другими привело к рождению одного из выдающихся достижений XX в. — *частной*, или, как ее еще называют, **специальной теории относительности (СТО)**. К ее

разработке имеют отношение ирландский физик Д. Лармор (1857—1942), французский физик и математик Ж. А. Пуанкаре (1854—1912), голландский физик Х. А. Лоренц (1853—1928), немецкий математик Г. Минковский (1864—1909). Однако главным ее автором был один из основоположников современной физики, работавший в Швейцарии, Германии (до прихода к власти нацистов) и США, А. Эйнштейн (1879—1955, Нобелевская премия 1921 г.)¹.

Величины, относящиеся к СТО, называют **релятивистскими** (лат. *relativ* — относительный). Один из **постулатов СТО** относится именно к неизменности (инвариантности) скорости света: *во всех инерциальных системах отсчета скорость света в вакууме имеет одно и то же значение $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, т.е. не зависит от относительного движения источника или приемника света.*

Инвариантность скорости света приводит к ряду удивительных следствий. Пусть ракета, с которой связана система O' , движется относительно системы O с постоянной скоростью v , параллельной осям x, x' (рис. 1.6). Эти оси совпадают, а на рисунке разнесены для наглядности. В некоторый момент времени точки A, B, C совпадают с точками A', B', C' (при $v = 0$ $AB = A'B' = BC = B'C'$). Пусть в этот момент в точках A (A') и C (C') вспыхнул свет. Очевидно, что от обоих источников он придет в точку B системы O одновременно, из чего мы заключаем (находясь в точке B), что вспышки света в точках A и C произошли *одновременно*. Одновременно ли возникнут эти вспышки в точке B' системы O' ?

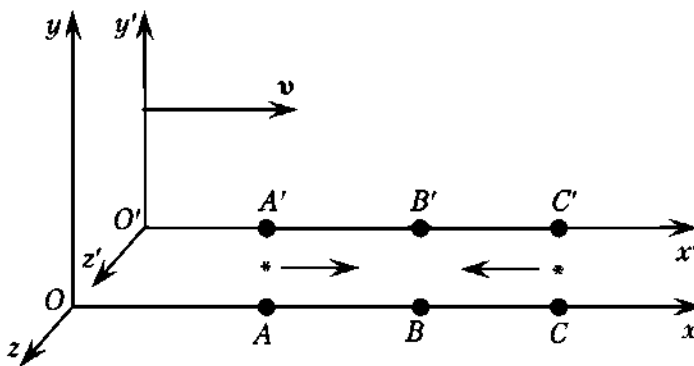


Рис. 1.6

Свет в ней имеет *ту же* скорость, однако сама точка B' движется *навстречу* вспышке в точке C' и *удаляется* от вспышки в точке A' . Поэтому от источника C' свет придет в точку B' *раньше*, чем от источника A' . Следовательно, *события, одновременные в системе O , оказываются неодновременными в системе O'* , т.е. *понятие одновременности относительно*. Этот поразительный результат ставит вопрос о *течении времени* в разных системах отсчета. Его сопоставление можно провести, пользуясь так называемыми световыми часами (см., например, [3]). Периоды Δt и $\Delta t'$ часов в системах O и O' оказались связанными соотношением

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (1.21)$$

¹ Нобелевские премии не всегда связаны с обсуждаемым открытием — их упоминание главным образом подчеркивает значимость ученого. В данном случае Нобелевская премия была выдана А. Эйнштейну за теорию фотоэффекта.

Систему, относительно которой предметы покоятся, называют **собственной системой отсчета**. Как следует из формулы (1.21), $\Delta t > \Delta t'$. В собственной системе отсчета время течет медленнее, чем в движущихся относительно нее.

Таким образом, тысячелетние представления о времени оказались ошибочными: *промежуток времени — понятие относительное* (время зависит от системы отсчета), и этот удивительный вывод подтверждается экспериментально!

Примеры практики

На высотах 10–30 км в результате бомбардировки космическими лучами атомов кислорода и азота рождается множество элементарных частиц (см. параграфы 6.2, 12.9), включая μ -мезоны (мюоны). В собственной системе отсчета они существуют $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ с, после чего распадаются. Даже если бы они двигались со скоростью света, максимальное расстояние, которое они были бы в состоянии преодолеть, равно $2 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^8 = 600$ м, однако их обнаруживают на Земле, т.е. они пролетают больше 10 км! Объяснение состоит именно в том, что мюоны «живут» $2 \cdot 10^{-6}$ с только в собственной системе отсчета, а по земным часам — гораздо дольше.

Сложившаяся ситуация выглядела для науки настоящей катастрофой. Для систем, показанных на рис. 1.6, преобразования Галилея имеют вид

$$x = x' + vt', y = y', z = z', t = t', \quad (1.22)$$

но теперь мы обязаны их корректировать, что изменяет прочно укрепившиеся представления о пространстве и времени. Соответствующую смелость проявил голландский физик-теоретик Х. Лоренц (1853–1928, Нобелевская премия 1902 г.). Преобразования Лоренца имеют вид

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (1.23)$$

$$y = y', z = z', \quad (1.24)$$

$$t = \frac{t' + vx'/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (1.25)$$

где c — скорость света в вакууме. Их принципиальное отличие в том, что они связывают воедино координаты и время, не позволяя говорить только о пространстве без учета времени, которое становится неотъемлемым четвертым параметром. Привычное трехмерное пространство заменяется четырехмерным. Значит ли это, что о преобразованиях Галилея следует теперь забыть?

Этот важный вопрос относится далеко не только к данному случаю, но и к развитию науки вообще. Когда появляется новый закон, к нему предъявляют требование, названное **принципом соответствия**: новая теория обязана включать в себя старую как частный случай для тех условий, при которых старая теория была справедлива.

ВОПРОС. Включают ли преобразования Лоренца прежние преобразования как частный случай?

ОТВЕТ. Преобразования Галилея оправдывали себя при скоростях $v \ll c$, с которыми на протяжении веков имел дело человек. Полагая в выражениях (1.23)–(1.25) $v/c \ll 1$, получаем формулу (1.22). Это свидетельствует о том, что преобразования Лоренца принципу соответствия удовлетворяют.

Из равенств (1.23), (1.25) следуют удивительные и важные на практике эффекты. Пусть вдоль оси x (см. рис. 1.6) расположен стержень. В системе O , где он покоится, его длина называется **собственной длиной** и определяется разностью координат его концов, измеренных одновременно: $l = x_2 - x_1$. В системе O' стержень движется со скоростью v , а одновременное измерение координат его концов производится *часами системы O'* . Тогда согласно соотношению (1.23)

$$l' = x_2' - x_1' = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{l}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (1.26)$$

Как видим, $l' < l$, т.е. *длина предмета в системе отсчета, относительно которой он движется, сокращается в направлении движения!* Таким образом, понятие «длина», как и понятие «время», относительно, т.е. *размер предмета зависит от системы отсчета*. Как следует из формул (1.25) и (1.26), полученные релятивистские эффекты тем больше, чем больше v/c .

Еще более важное следствие из преобразований Лоренца относится к правилу сложения скоростей. Из выражений (1.23), (1.25) получаем

$$\Delta x = \frac{\Delta x' + v\Delta t'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}; \quad (1.27)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t' + v\Delta x'/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (1.28)$$

Разделив первое равенство на второе, найдем

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta x' + v\Delta t'}{\Delta t' + v\Delta x'/c^2}. \quad (1.29)$$

Разделив теперь числитель и знаменатель правой части на $\Delta t'$ и перейдя от конечных приращений к бесконечно малым, получим новое преобразование скоростей:

$$u = \frac{u' + v}{1 + vu'/c^2}, \quad (1.30)$$

где u, u' — скорости движения тела вдоль оси x в системах O и O' .

ВОПРОС. Удовлетворяет ли формула (1.30) принципу соответствия?

ОТВЕТ. При $vu'/c^2 \ll 1$ формула (1.30) превращается в закон (1.19). Следовательно, ответ положительный.

Казалось бы, выражение (1.30), как и (1.19), не препятствует достижению *любых* скоростей. Если, например, в системе O' (см. рис. 1.6) вдоль оси x'

движется частица со скоростью u' , которая чуть меньше, чем c , и если v чуть меньше, чем c , то в сумме они вполне могут быть больше, чем c . Однако из выражения (1.30) следует неравенство

$$c - u = c - \frac{u' + v}{1 + u'v/c^2} = \frac{(c - v)(c - u')}{c(1 + u'v/c^2)} > 0, \quad (1.31)$$

так как обе скобки числителя положительны по условию. Отсюда скорость u частицы и в системе O при любых u' и v меньше скорости света!

Скорость света в вакууме — максимально возможная скорость в природе.

Со времен Ньютона в науке утвердились представления о *дальнодействии*, согласно которым силы, например, тяготения или кулоновского взаимодействия распространяются мгновенно на любые расстояния. Полученный в СТО результат это опровергает — верной оказывается теория *близкодействия*: ни один процесс, ни один сигнал не может распространяться со скоростью, большей скорости света!

Немецкий астроном Г. Ольберс (1758—1840) удивлялся черному ночному небу (парадокс Ольберса): поскольку Вселенная бесконечна, то при любом направлении взгляда он должен видеть звезды, т.е. небо должно ярко светиться! Дело, однако, в том, что, имея конечную скорость, свет удаленных звезд не успевает до нас долетать.

Итак, если пользоваться преобразованиями Лоренца, то не только законы механики, но и законы электродинамики (поведение света) сохраняют свой вид при переходе из одной системы отсчета в другую и не могут служить основой для определения «истинного» движения. Это позволило Эйнштейну распространить принцип относительности на *все формы движения материи*. **Первый постулат СТО** гласит: *в инерциальных системах все явления природы при одинаковых начальных условиях протекают одинаково.*

Выводы СТО повергли ученых и философов в растерянность. Более двух столетий в науке, технике и мировоззрении торжествовала механика Ньютона. Современный ему поэт А. Поуп писал (один из переводов): «Был этот мир глубокой тьмой окутан, / Да будет свет! И вот явился Ньютон». После появления СТО крупный английский астрофизик А. Эддингтон (1882—1944) добавил к этим строкам плоды упомянутой растерянности: «Но сатана недолго ждал рванца: / Пришел Эйнштейн — и стало все, как раньше» (пер. С. Я. Маршака).

После периода бурных дискуссий стало ясно, что в относительности понятий «пространство», «время», «скорость» ничего разрушительного для взглядов на мир нет. В сущности, уже принцип относительности Галилея свидетельствовал о том, что человеческие суждения о движении могут быть обманчивы: их следует рассматривать с учетом условий наблюдения, а СТО лишь развивает этот вывод. Она дает новый важный инструмент познания, относящийся к процессам, протекающим с большой скоростью и характерным для космоса, ускорителей и т.д.

1.3. Динамика материальной точки

Констатации того, *как* движутся частицы, чаще всего недостаточно — обычно требуется знать, *почему* они движутся так или иначе. На эти вопросы отвечает другой раздел механики — **динамика**, в котором изучают зако-

номерности движения тел под действием сил. Динамика основана на законах И. Ньютона (1643—1727) — выдающегося английского физика, заложившего основы естествознания на базе работ предшественников, прежде всего Г. Галилея, Н. Коперника и И. Кеплера.

Если воздействий на тело нет или они друг друга компенсируют, то оно движется свободно. В системе отсчета, связанной с другим *свободно движущимся* телом, его движение имеет вид прямолинейного и равномерного, т.е. происходит *с постоянной скоростью*. Его называют **движением по инерции**. Закон инерции установили Г. Галилей и (независимо) французский философ, физик и математик Р. Декарт (1596—1650), однако он больше известен как **первый закон Ньютона**: *тела сохраняют постоянную скорость, пока воздействие со стороны других тел не выводит их из этого состояния*.

Этот закон выполняется только в *инерциальных* системах отсчета (ИСО), скорость которых постоянна, а системы отсчета, в которых он не выполняется, называют **неинерциальными**.

Во многих теоретических и практических задачах ИСО связывают с поверхностью Земли и называют *лабораторной системой отсчета*. Поскольку Земля вращается вокруг своей оси, то, строго говоря, это неправильно.

ВОПРОС. Велика ли ошибка?

ОТВЕТ. Нормальное ускорение поверхности Земли: $a_n = v^2/R$, где $R = R_3 \cos \varphi$, R_3 — радиус Земли на экваторе; φ — широта местности; $v = 2\pi R/T$, $T = 24$ ч — период вращения Земли вокруг своей оси. Отсюда даже для экватора $a_n = 4\pi^2 R_3/T^2 = 0,033$ м/с², что по отношению к ускорению свободного падения g составляет ~3%. Земля вращается также вокруг Солнца, однако нормальное ускорение ее орбитального движения еще меньше. Поэтому для большинства задач связывать ИСО с поверхностью Земли вполне допустимо, и в данном учебнике механическое движение рассматривается именно в лабораторной системе отсчета, если иное не оговорено.

Движение по инерции нарушается вследствие взаимодействия тел, меру которого предложил Р. Декарт, введя для этого понятие «**сила**». Под действием *одной и той же* силы *разные* тела получают *разные* ускорения, как бы по-разному сопротивляясь ее действию. Это свойство материи названо **инертностью**. Мерой инертности является **масса**. Ее можно определить исходя из того, что под действием *разных* сил F_1, F_2, \dots *одно и то же* тело получает *разные* ускорения a_1, a_2, \dots . При этом оказывается

$$\frac{F_1}{a_1} = \frac{F_2}{a_2} = \dots = \text{const.} \quad (1.32)$$

Именно эту константу принимают за *инертную* массу тела. Международный эталон массы в 1 кг (из платино-иридиевого сплава) хранится в Севре, расположенном вблизи Парижа.

Опыты показывают, что соотношение (1.32) справедливо *при разных направлениях вектора F*, т.е. в отличие от силы *масса — величина скалярная*. Ее распределение по объему V тела характеризуют **плотностью** ρ . При равномерном распределении массы по объему

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (1.33)$$

Если же масса распределена неравномерно, то формула (1.33) определяет лишь *среднюю* плотность, а точное значение $\rho = dm/dV$. У воды, например, $\rho \approx 1$ г/см³, в центре Земли $\rho \approx 10$ г/см³, в центре Солнца $\rho \approx 10^2$ г/см³, а у нейтронных звезд $\rho \approx 10^{15}$ г/см³.

Масса определяет ускорение тела, *сонаправленное* с действующей на него силой. В соответствии со **вторым законом Ньютона**

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m}, \quad (1.34)$$

т.е. *ускорение, приобретаемое телом под действием силы, пропорционально силе и обратно пропорционально массе тела.*

Итак, ускорение определяется через силу, которая его вызывает. В то же время сила — это мера взаимодействия тел, определяемая ускорением свободного тела либо деформацией несвободного. В уравнении (1.34) предполагается последнее, чтобы ускорение не определялось само через себя. Уравнение (1.34) называют также **уравнением движения материальной точки**. В нем \mathbf{F} — это *резльтирующая* сила:

$$\mathbf{F} = \sum_i \mathbf{F}_i$$

Закон (1.34) *постулируется*, т.е. ниоткуда не выводится. Он получен приемом Ньютона на основе логического анализа и обобщения результатов многочисленных наблюдений и научной интуиции.

Пользуясь равенством (1.7), формулу (1.34) можно представить также в виде

$$\mathbf{F} = \frac{m d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d(m\mathbf{v})}{dt} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}, \quad (1.35)$$

где $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ есть **импульс**. Из формулы (1.35) следует соотношение

$$\mathbf{F} dt = d\mathbf{p}. \quad (1.35')$$

Произведение $\mathbf{F} dt$ называют **импульсом силы**. Формулы (1.35), (1.35') имеют более общий вид, чем (1.34), поскольку включают и те случаи, когда *масса зависит от времени*. Уравнение (1.35') формирует и некоторую симметрию в отношении терминологии: *импульс силы, действующий на частицу, равен приращению импульса частицы.*

Уравнение (1.34) определяет единицу силы **ньютон**: $1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2$, а она, в свою очередь, определяет другие производные единицы, например давления:

$$p = \frac{F}{S}, \quad (1.36)$$

где F — модуль силы, нормальной к поверхности площадью S . Единица давления **паскаль** (Па) названа в честь французского математика, физика и философа Б. Паскаля (1623—1662): $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н}/\text{м}^2$. Кроме основных и производных единиц СИ, стандарт разрешает применять *десятичные кратные* (кило-, мега- и т.д.) и *дольные* (милли-, микро- и т.д.) единицы, а также некоторые *внесистемные* единицы, например минута, литр.

Характер взаимодействия тел (независимо от природы этого взаимодействия) выражает **третий закон Ньютона**: *силы взаимодействия тел равны по модулю и направлены в противоположные стороны вдоль общей прямой.*

Законы Ньютона легли в основу бурного развития техники и казались всеобъемлющими. Еще Х. Гюйгенс утверждал, что все природные явления в конечном счете сводятся к механике, и такая точка зрения стала основой философского направления, названного «механицизм», или «механический детерминизм». Время внесло в него существенные коррективы, но не умалило ценности законов Ньютона, до сих пор позволяющих решать множество практически важных задач, в том числе в военном деле.

1.4. Виды сил

Влияние сил на движение определяется их спецификой.

1.4.1. Силы упругости

Под действием силы возникает не только ускорение, но и **деформация** тел.

Деформация называется **упругой**, если после прекращения действия силы тело возвращается к первоначальной форме и размерам.

Упругая деформация обусловлена **электростатическим взаимодействием** между атомами, подобным действию пружинки: при попытке удалить друг от друга атомы они притягиваются, а при попытке сблизить — отталкиваются. Благодаря этому внешняя сила действует вдоль всего твердого тела, например троса (рис. 1.7).

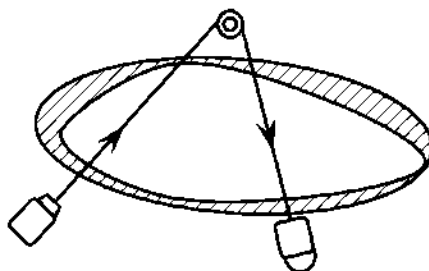


Рис. 1.7

Помимо упругой, существует пластическая деформация.

Деформация называется **пластической**, если после прекращения действия силы тело сохраняет форму и размеры, которые оно приобрело под ее действием.

Приведенные определения подразумевают *идеально* упругую и *идеально* пластическую деформации.

Приращение $\Delta x = x - x_0$ длины x упругого стержня под действием силы называют его **абсолютным удлинением**.

ВОПРОС. Почему удлинение под действием постоянной силы прекращается?

ОТВЕТ. Равнодействующая сил стала равна нулю: в теле возникла *упругая сила* $F_{\text{упр}}$, равная по модулю и антипараллельная внешней силе F .

Связь этой силы с удлинением определил разносторонний английский физик Р. Гук (1685—1703). Его считают первым ученым, профессионально занимавшимся именно физикой, вычлненной из других направлений науки. Установленный им в 1660 г. **закон упругости** — это первый *количественный*

закон физики: *упругая сила пропорциональна абсолютному удлинению*, т.е.

$$F = -k\Delta x. \quad (1.37)$$

Знак «минус» связан здесь с тем, что вектор F антипараллелен оси x . Формула (1.37) справедлива не только при *растяжении (сжатии)*, но и при других видах деформации: *сдвиге, изгибе* или *кручении*, где вместо абсолютного удлинения фигурируют углы поворота или стрела прогиба (в лабораторном практикуме измеряют удлинение пружины подвески автомобиля и стрелу прогиба листа рессоры).

В выражении (1.37) k — это *жесткость*, коэффициент, характеризующий конкретное тело. При проектировании или исследовании *разных* упругих тел формула (1.37) неудобна — нужна характеристика, привязанная не к телу со случайными размерами, а к базовым параметрам материала.

Мысленно вычленим в однородном упругом стержне длиной l и сечением S составляющие его цилиндрические фрагменты такой же длины, но с единичной площадью основания (рис. 1.8). На каждое основание действует вдоль оси стержня сила $\sigma = F/S$, а поскольку абсолютное удлинение Δl каждого цилиндрика равно абсолютному удлинению всего стержня, то $\Delta l \sim \sigma$. Так как элементы стержня l/n одинаковой длины получают одинаковые удлинения $\Delta l/n$, то общее удлинение стержня $\Delta l \sim l$. Из комбинации этих формул получаем

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (1.38)$$

где $\sigma = F_{\text{упр}}/S$ — *упругое напряжение*. Оно показывает, какая упругая сила действует на единичное поперечное сечение стержня; $\varepsilon = \Delta l/l$ — относительное удлинение, а коэффициент пропорциональности E называется *модулем Юнга* — в честь английского физика, механика и астронома Т. Юнга (1773—1829). Формула (1.38) выражает *закон Гука: упругое напряжение пропорционально относительному удлинению*.

Как следует из формулы (1.38), $E = \sigma/\varepsilon$, т.е. модуль Юнга показывает, какое

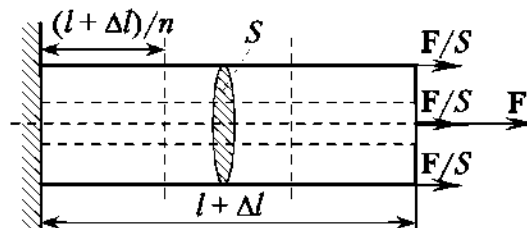


Рис. 1.8

упругое напряжение возникает при $\varepsilon = 1$. Будучи привязанной к стержню единичной длины с единичным поперечным сечением, эта характеристика зависит уже *только от его материала* (значения E приведены в справочных таблицах).

Зависимость $\sigma(\varepsilon)$, в том числе выходящую за пределы упругости, называют *диаграммой растяжений*. Она характеризует не только упругие, но и пластические деформации разных материалов вплоть до напряжений, при которых материал течет и далее разрывается, что важно для технологических операций и поражающего действия оружия.

История оружия развивается вместе с историей человечества. Мускульных возможностей человека достаточно, чтобы повалить и даже убить зверя или соперника, применяя технику единоборств. Однако человек не контролирует расстояния больше нескольких метров, устает и потому стал заменять физические усилия техническими средствами, позволяющими опережать противника и дистанцироваться от него. При этом древний человек интуитивно пришел к заострению камней, палок и стрел: чем меньше площадь сечения, тем больше σ (при той же силе) и выше вероятность разрыва материала. Отсюда — колющее, режущее и рубящее оружие, применяемое до сих пор.

На свойства материалов влияют механическая и тепловая обработки, а также время, в течение которого на них действует сила. Если, например, упругую сталь нагреть до желтого каления, то она становится пластичной, и наоборот — пластичный свинец, охлажденный жидким азотом, становится хрупким. Если упругое тело долго держать в деформированном состоянии, то после снятия нагрузки оно не полностью восстанавливает форму. Это явление называют усталостью материала.

Если бы не было упругого сопротивления, то невозможно было бы перемещаться по поверхности. Не работала бы ни одна машина: любое действие ее деталей друг на друга приводило бы к изменению их формы и размеров.

Упругие элементы техники — это рессоры, шины, пружины автомобилей, взрыватели мин, затворы карабинов, упругие подвески перевозимых изделий и т.д. В то же времяковка, штамповка и прокат основаны на пластических деформациях, токарная обработка, сверление и фрезерование основаны на преодолении предела прочности (у орудийного ствола он должен быть большим) и т.д.

1.4.2. Сила трения

Если расстояние между атомами разных тел порядка размера атома ($\sim 10^{-10}$ м), то электростатическое притяжение противодействует относительному движению тел вдоль поверхности их соприкосновения (этим же объясняется действие клея). Противодействие усугубляется микровыступами и впадинами, образующими «пятна» контакта. При попытке сдвинуть одно тело относительно другого силой F возникает компенсирующая ее сила — $F_{\text{пок}}$, которая называется **силой трения покоя**. Ее максимальное значение, при котором еще не возникает относительное движение тел, называют **предельной силой трения покоя** (F_{max}). Она зависит от материалов тел, состояния их поверхностей и **силы нормального давления** N , определяющей количество и глубину взаимных «зацеплений» в пятнах контакта. Французские физики Г. Амонтон (1663—1727) и (значительно позже) Ш. Кулон (1736—1806) нашли зависимость

$$F_{\text{max}} = kN, \quad (1.39)$$

где k — **коэффициент трения покоя**. При $F < F_{\text{max}}$ поверхности не проскальзывают, что лежит в основе движения пешеходов, автомобилей и т.д. Для увеличения F_{max} шины автомобиля снабжают протектором с «рисунком», зимой применяют шипы, ими снабжают также гусеницы танка, ботинки бегунов и альпинистов и т.п. (в лабораторном практикуме изучают трение между автомобильными дисками сцепления).

При $F > F_{\max}$ упругие деформации переходят в пластические: неровности сминаются, частично разрушаются (на этом основаны шлифовка и полировка), и тело приходит в движение. Здесь действует уже **сила трения скольжения**, которая характеризуется аналогичной зависимостью:

$$F_c = k_c N, \quad (1.40)$$

где k_c — **коэффициент трения скольжения**, который зависит не только от материала и состояния поверхностей, но и от скорости движения.

Вышеупомянутая польза трения диалектически уравновешена ее противоположностью — трение приводит к износу трущихся поверхностей и их нагреванию, что влечет потерю энергии движения. Для уменьшения трения скольжения подбирают материалы трущихся пар и обрабатывают их поверхности до зеркальной гладкости, как, например, внутреннюю поверхность ствола оружия или цилиндра двигателя. С этой же целью применяют смазку — вязкую жидкость, которая изменяет сам характер трения — оно происходит уже не между поверхностями, а *между слоями жидкости* (см. параграф 4.4).

Более радикальный способ уменьшения динамических и энергетических потерь — замена трения скольжения на трение *качения*, к которому неизвестный гений пришел тысячи лет назад. Качение — это также диалектический переход к противоположности. Если при скольжении сопротивление выступов *преодолевается*, то качение их *использует*: оно подобно качению шестерни по зубчатой рейке. Однако качение также не лишено сопротивления. Ему препятствуют проскальзывания в некоторых пятнах контакта: сила трения скольжения F' (рис. 1.9) создает момент, направленный противоположно крутящему моменту. Кроме того, под действием силы тяжести колеса возникает *деформация поверхности опоры*. При неподвижном колесе реакция опоры N направлена вверх и проходит через центр вращения O (рис. 1.9), а при накате на выдавленный валик вектор N' создает момент, направленный противоположно крутящему моменту. Чем меньше сила нормального давления, больше радиус r катящегося тела, тем меньше **сила трения качения**:

$$F_k = k_k \frac{N}{r}, \quad (1.41)$$

где k_k — **коэффициент трения качения**, определяемый материалом и состоянием поверхности.

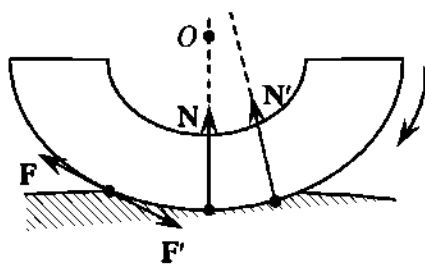


Рис. 1.9

Примеры практики

В ВВТ сила трения определяет работу дисков сцепления, тормозов, подшипников, гусениц и колес. На льду автомобили буксуют и их заносит. Большое влияние на КПД оружия оказывает трение между снарядом и стенками канала, особенно существенное у оружия, где снаряд врезается в его нарезные канавки. Проходимость боевых машин определяется в том числе площадью опоры на грунт, от которой зависит удельное давление, и т.д.

1.4.3. Сила тяготения

Практически во всех явлениях динамики важную роль играет сила тяготения, определяемая **законом всемирного тяготения**:

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (1.42)$$

где m_1, m_2 — массы частиц; r — расстояние между ними; $\gamma \approx 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$ — **гравитационная постоянная**. Закон (1.42) получил И. Ньютон (хотя Р. Гук настаивал на своем приоритете), изучив законы Кеплера, основанные на анализе астрономических наблюдений движения планет Солнечной системы. Ньютон также сравнивал центростремительное ускорение Луны с ускорением свободного падения тел на Землю.

Гравитационную постоянную определил английский физик Г. Кавендиш (1731—1810), измеряя силу притяжения между известными массами в тонких экспериментах с крутильными весами (проводил он их в уединении и редко публиковал свои труды; лишь через десятки лет выяснилось, что Кавендиш во многом опередил других ученых).

Гравитационное взаимодействие относится к тем четырем фундаментальным взаимодействиям, которые определяют физическую картину мира (см. гл. 12). Оно весьма невелико и проявляется лишь при огромных массах. Так, в 2015 г. астрофизики наблюдали гравитационные волны, возникшие при слиянии двух черных дыр с массами по 30 масс нашего Солнца каждая. Для фиксации этих волн на Земле потребовалось измерять изменение расстояния на 10^{-19} м !

В формуле (1.42) фигурирует не та *инертная* масса, что в формуле (1.34). Здесь ее следовало бы называть гравитационной и обозначать по-другому. Установлено, однако, что эти массы *строго равны* — достигнутая относительная точность проверки этого равенства $\sim 10^{-12}$. Более того, равенство инертной и гравитационной масс составляет суть **принципа эквивалентности**, выдвинутого Эйнштейном. Согласно этому принципу в неинерциальной системе отсчета отличить действие ускорения от действия тяготения невозможно.

Если тела имеют *конечные* размеры, то силу тяготения следует вычислять путем векторного сложения (интегрирования) сил притяжения каждой частицы одного тела ко всем частицам второго. Исключение — тела сферической формы. Здесь результат интегрирования снова сводится к формуле (1.42), где r — расстояние между частицей и центром шара, а m_1, m_2 — массы шара и частицы (то же относится к двум шарам). Землю, например, можно приближенно считать шаром с радиусом R_3 , а тела у ее поверхности по сравнению с нею — частицами. В таком случае частное проявление силы тяготения, действующей на тело массой m со стороны планеты, называют **силой тяжести**:

$$F_T = gm, \quad (1.43)$$

где $g = \gamma M_3 / R_3^2$ — постоянная, смысл которой — ускорение, что следует из сопоставления формул (1.43) и (1.34). Подставляя характеристики Земли, получаем $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — **ускорение свободного падения** тел. Постоянство ускорения свободного падения впервые установил Галилей.

ВОПРОС. Почему спутник не падает на Землю?

ОТВЕТ. В этом случае $g = a_n$. В соответствии с формулой (1.10) при $a_n < g$ радиус орбиты уменьшается, а при $a_n > g$ — увеличивается. Орбитальное движение спутника — это, в сущности, и есть его свободное падение, однако «падает» он ровно на столько, на сколько за время падения искривляется поверхность Земли.

При $a_n = g$ из формулы (1.10) следует важная для космонавтики **первая космическая скорость**, которую должен иметь спутник, чтобы остаться на околоземной орбите:

$$v = \sqrt{gR_3} \approx 8 \text{ км/с.} \quad (1.44)$$

Расчет этой скорости сделал еще Ньютон, но достигнута она лишь в 1957 г. под руководством крупного организатора советской науки С. П. Королева (1907–1966).

Сила тяготения определяет **баллистику**, позволяющую дистанцироваться от противника и тем самым меньше подвергать опасности себя и увеличивать масштаб его поражения по дальности и площади. Начало изучения баллистики положил итальянский ученый (ученик Галилея) Э. Торричелли (1608–1647). Он установил, что тела, брошенные под углом к горизонту, движутся по параболе.

Примеры практики

Уже в древности мускульную баллистику заменили пращей, катапультой и иными техническими средствами. Например, французский требушет XV в. — механизированная праща, использующая рычаг, — мог метать камни массой ~800 кг на расстояния ~300 м, а в конце XIX в. в береговой обороне США применялась пневматическая пушка Э. Залинского, способная метать снаряды массой в несколько сот килограммов на расстояния до 2 км. Каждой пушке требовался специальный двигатель, снабжавший ее воздухом с давлением ~10² атмосфер.

В конце концов основным вариантом кинетического оружия стало огнестрельное, которое обеспечивает относительно высокую точность и убийную силу снаряда на значительных расстояниях. Вершина такого оружия — баллистическая ракета, траектория которой содержит активный участок, где работают ее двигатели, и пассивный, определяемый вектором скорости в начале участка. То же относится и к тем космическим аппаратам, траектории которых проходят вблизи нескольких планет: маршевые двигатели задают периодические толчки, в промежутках между которыми действует тяготение планет.

Пример 1.3. Подразделение противника залегло под обрывом высотой h на расстоянии l от уступа (рис. 1.10). Определим, достигнет ли цели граната, брошенная горизонтально со скоростью v_0 , и где взорвется — в воздухе или на земле, если запал горит t секунд?

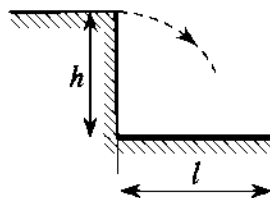


Рис. 1.10

Решение. Дальность полета гранаты по горизонтали $l_1 = v_0 t_1$, где t_1 — время ее падения, определяемое высотой обрыва: $t_1 = \sqrt{2h/g}$. Таким образом, $l_1 = v_0 \sqrt{2h/g}$. Сопоставляя l_1 и l , а также t_1 и t , получим ответы на поставленные вопросы.

1.4.4. Силы инерции

Примеры практики

В стартующей ракете на космонавта действуют сила тяжести mg и реакция опоры P' (рис. 1.11). В соответствии с формулой (1.34)

$$P' + mg = ma, \quad (1.45)$$

где a — ускорение ракеты.

Проекция равенства (1.45) на направление вектора a : $P' - mg = ma$, откуда $P' = m(g + a)$. Это и объясняет те *перегрузки*, которые испытывают космонавты.

Если же тело *падает* с ускорением a , то вышеприведенные операции приводят к соотношению $P' = m(g - a)$. Такое уменьшение веса чувствуется, например, при спуске на лифте. На орбитальной станции $a = g$, и получаем $P' = 0$, т.е. **состояние невесомости**.

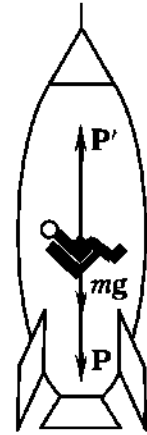


Рис. 1.11

В рассмотренных примерах есть, однако, немало странного. В системе отсчета, связанной со стартующей ракетой, на космонавта действует результирующая сила ($P' > mg$), однако вопреки второму закону Ньютона он находится в состоянии покоя! Бывает и наоборот: в изолированном салоне автомобиля вы не обнаружите тело, которое прижимает вас к спинке сиденья, наклоняет вперед или в сторону. Поскольку ускорение возникает здесь не под действием тел, то отсутствует и сила, которая определена как мера действия одного тела на другое. Если же исходить из эйнштейновского принципа эквивалентности, то наличие ускорения эквивалентно наличию силы тяготения. Это позволяет сохранять понятие «сила» и для таких случаев. Так как тело проявляет здесь сопротивление ускоренному движению, т.е. инерционность, такую силу назвали **силой инерции**:

$$F_{\text{и}} = -ma. \quad (1.46)$$

Если учесть силу инерции, законы Ньютона «восстанавливаются в правах».

Примеры практики

При длительной поездке на автомобиле грузы в кузове чаще всего смещаются вперед. Это вызвано тем, что среднее ускорение торможений, как правило, больше, чем разгонов.

При скорости 200 м/с торможение гоночного автомобиля происходит менее чем за 2 с. Это означает, что ускорение составляет $\sim 10g$, т.е. пилот испытывает десятикратные перегрузки.

При раскрытии парашюта за 1–2 с скорость уменьшается от 50–100 м/с до 5–7 м/с, т.е. ускорение ~ 6 – $10g$, и парашютист испытывает динамический удар (следующий удар возникает при приземлении).

На некоторых летательных аппаратах, например ракетах, силы инерции используют в инерциальных системах навигации и наведения, преимущество кото-

рых — полная автономность: они не требуют внешних источников информации или ориентиров, их функционирование скрытно и нечувствительно к помехам. Установленные на борту инерциальные датчики определяют составляющие вектора ускорения ракеты или ядерной бомбы (рис. 1.12), и по их сигналам вырабатываются команды коррекции полета.

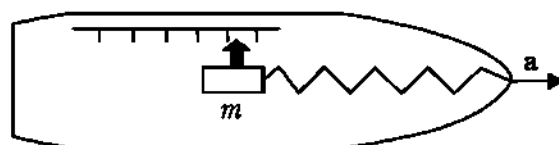


Рис. 1.12

Для некоторых снарядов приспосабливают предохранитель взрывателя, который снимается силой инерции при достижении снарядом заданного осевого ускорения при выстреле.

Силу инерции используют и в противотанковом подкалиберном снаряде (рис. 1.13), который имеет легкий корпус 1 и тяжелый твердосплавный сердечник 2 (вольфрам, обедненный уран, металлокерамика). При ударе о броню 3 легкий корпус тормозится с ускорением a , деформируется и слетает, а на сердечник действует сила инерции $-m_{\text{сер}} a$. Он пробивает в броне отверстие, и теплота, выделившаяся при торможении, плавит сердечник и броню, а раскаленные осколки поражают экипаж и оборудование (мельчайшие частицы урана разносятся воздушными потоками и небезопасны для личного состава).

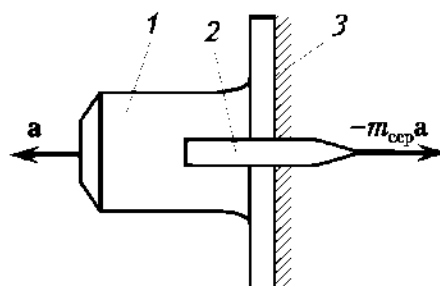


Рис. 1.13

Ускорение a системы отсчета может иметь и нормальный компонент a_n , поэтому на поворотах трассы водителя отклоняет в сторону от центра кривизны центробежная сила инерции $F_{\text{цб}}$. Она же действует на летчика, совершающего «мертвую петлю». В результате в верхней точке петли вес летчика уменьшается, а в нижней он испытывает перегрузки.

Центробежная сила прижимает жидкость к стенкам ротора центрифуги. В бронетанковой и колесной технике этим пользуются, например, для очистки масла в масляных фильтрах. Механические примеси имеют большую плотность, чем масло, и в соответствии с формулой (1.46) на них действует большая сила инерции. В быстро вращающемся роторе они отбрасываются к стенкам, а очищенное масло отводится из центральной части фильтра.

Резюме

Подводя итоги настоящей главы, отметим ее основные положения.

Механическое движение относительно в том смысле, что координаты и скорости частиц определяются выбором системы отсчета, однако ни в какой инерциальной системе отсчета невозможно определить сам факт движения — все явления механики и все иные явления природы инвариантны по отношению к ее выбору.

Механическое движение определяется тремя законами Ньютона, а при скоростях, соизмеримых со скоростью света, — законами релятивистской механики.

Взаимодействие тел в механике определяют силы упругости, трения, тяготения и инерции, приводящие к ускорениям или (и) деформациям тел.

Законы кинематики и динамики широко применяют в технике, в том числе ВВТ.

Вопросы для самоконтроля

1. Масса десантника 60 кг. Во сколько раз его вес при подъеме на вертолете со скоростью 6 м/с больше, чем при спуске с той же скоростью?
2. Плавающий танк переплывает реку со скоростью относительно воды вдвое большей скорости течения. Под каким углом он должен держать курс, чтобы его перемещение относительно берега было минимальным?
3. На рис. 1.12 упрощенно изображен инерциальный датчик ускорения. Как изменится его чувствительность, если увеличить вдвое: 1) массу m ; 2) жесткость пружины?
4. Как запустить спутник, чтобы он висел над одной и той же точкой поверхности Земли (такая орбита называется геостационарной)?
5. Запал сигнальной ракеты горит в течение времени t . Как связаны начальная скорость и угол ее пуска, обеспечивающие вспышку в наивысшей точке траектории?
6. Тягач буксирует орудие с постоянной скоростью, под углом к которой направлен буксирный трос (рис. 1.14). Не противоречит ли это первому и второму законам Ньютона?

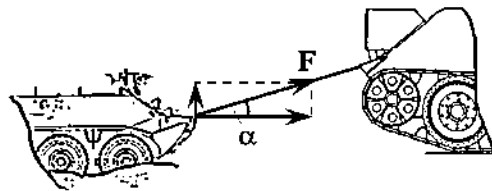


Рис. 1.14

7. Чтобы незакрепленный контейнер с грузом при движении не сдвигался, один из такелажников предлагает поставить его на платформу гранью с большей площадью и в качестве аргумента приводит малую площадь скольжения коньков. Другой утверждает, что от площади грани результат не зависит. Кто из них прав?
8. В каком случае можно быстрее протащить груз по грунту на заданное расстояние — приложить силу F , параллельную дороге, или силу $2F$, направленную к ней под углом 60° ?
9. Почему передвигаться по льду удобнее короткими шагами?
10. Почему на закругленном участке дороги водители снижают скорость?

Задачи с решениями

1.1. Бомбардировщик пикирует под углом 60° к горизонту. На каком расстоянии от цели по горизонтали должна быть сброшена бомба, если в момент ее выпуска скорость самолета 720 км/ч, а высота полета 500 м? Сопротивление воздуха не учитываем.

Дано: $\varphi = 60^\circ$; $v_0 = 720 \text{ км/ч}^1 = 200 \text{ м/с}$; $h = 500 \text{ м}$.

$S = ?$

¹ Здесь и далее в условии задач в случае указания данных во внесистемных единицах приводится перевод их в единицы СИ.

Решение. Искомое расстояние определяется горизонтальной составляющей скорости бомбы и временем ее падения:

$$S = v_0 t \cos \varphi.$$

Время t определяется высотой h при выпуске бомбы и ее равноускоренным падением:

$$h = v_0 t \sin \varphi + \frac{gt^2}{2}.$$

Решая это квадратное уравнение относительно t , получим

$$t = -\frac{v_0 \sin \varphi}{g} \pm \sqrt{\left(\frac{v_0 \sin \varphi}{g}\right)^2 + \frac{2h}{g}}.$$

При этом знак « \pm » перед корнем физического смысла не имеет.

Подставляя данные, получим $t = 2,67$ с. Пользуясь этим значением, находим $S = 267$ м.

1.2. Начальная скорость снаряда — v_0 , а угол линии бросания с горизонтом равен φ . Определим время и дальность полета снаряда, максимальную высоту траектории и радиус кривизны в верхней ее точке. Сопротивление воздуха не учитываем.

Решение. Скорости и координаты снаряда определяются выражениями

$$v_x = v_0 \cos \varphi, \quad v_y = v_0 \sin \varphi - gt, \quad (1.47)$$

$$x = v_0 t \cos \varphi, \quad y = v_0 t \sin \varphi - \frac{gt^2}{2}. \quad (1.48)$$

Если из последних двух уравнений исключить t , то получим траекторию полета $y(x)$ в виде параболы (рис. 1.15).

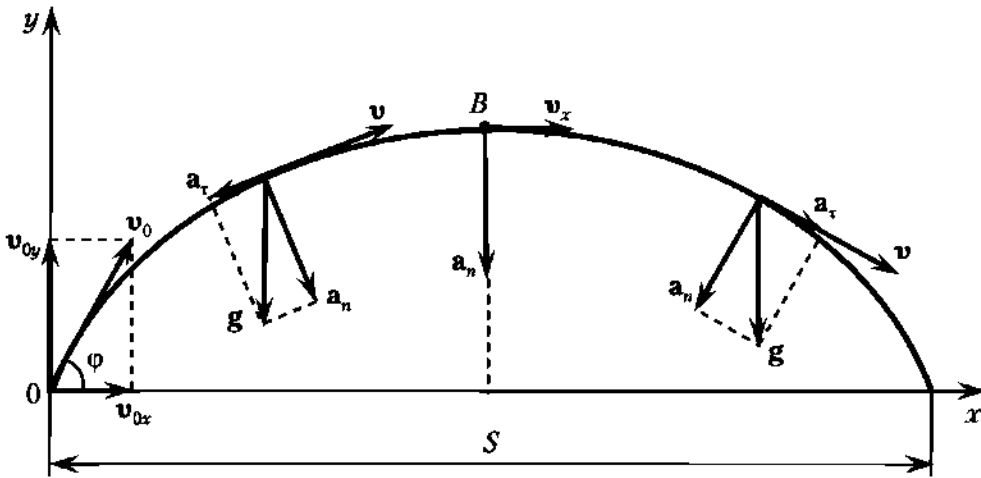


Рис. 1.15

Вследствие симметрии траектории время $t_{\text{п}}$ движения снаряда равно удвоенному времени его подъема к высшей точке траектории:

$$t_{\text{п}} = \frac{2v_0 \sin \varphi}{g}. \quad (1.49)$$

Поэтому дальность полета

$$S = v_x t_{\text{п}} = \frac{2v_0^2 \cos \varphi \sin \varphi}{g} = \frac{v_0^2}{g} \sin 2\varphi. \quad (1.50)$$

Как следует из формулы (1.50), она максимальна при $\varphi = 45^\circ$:

$$S_{\max} = \frac{v_0^2}{g}. \quad (1.51)$$

Высоту h траектории легко найти из формулы пути для равноускоренного (или равнозамедленного) движения за время $t = t_{\text{дв}}/2$. Пользуясь формулой (1.49), получим

$$h = \frac{gt^2}{2} = \frac{v_0^2}{2g} \sin^2 \varphi.$$

Как видим, высота h максимальна при угле $\varphi = \pi/2$:

$$h_{\max} = \frac{v_0^2}{2g}. \quad (1.52)$$

В высшей точке B траектории (см. рис. 1.15) $v = v_x = v_0 \cos \varphi$, $a_x = a_t = 0$, $|a_y| = |a_n| = g = v^2/R$, где R — радиус кривизны. Отсюда

$$R = \frac{v_0^2 \cos^2 \varphi}{g}.$$

Пример. Для пули калибра 7,62 мм, выпущенной бронетранспортерным пулеметом Калашникова (ПКБ) с начальной скоростью 825 м/с под углом 30° к плоскости горизонта, получим $t_{\text{дв}} = 84,2$ с; $h \approx 9$ км; $S \approx 60$ км; $R \approx 26$ км.

Примечание. Как следует из формулы (1.51), дальность стрельбы на Луне больше, чем на Земле.

1.3. Десантник упал на скалистый склон. В каком случае у него больше шансов не соскользнуть в пропасть — если сбросить со спины рюкзак со снаряжением или оставить?

Решение. На десантника действуют сила тяжести mg , реакция опоры P и сила трения покоя $F_{\text{тр}}$ (рис. 1.16). В соответствии с формулой (1.34)

$$mg + P + F_{\text{тр}} = ma.$$

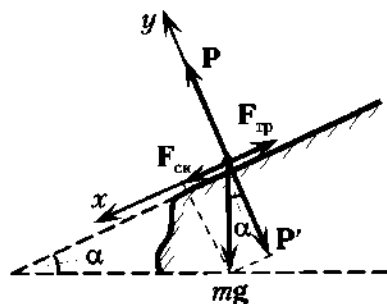


Рис. 1.16

Выбираем ось x в направлении возможного движения. В проекции на нее уравнение принимает вид

$$mg \sin \alpha - F_{\text{тр}} = ma.$$

Учитывая формулу (1.39), получим

$$mg \sin \alpha - kP' = ma,$$

где k — коэффициент трения покоя, $P' = P = mg \cos \alpha$. Поэтому

$$mg \sin \alpha - kmg \cos \alpha = ma.$$

После сокращения получаем

$$g \sin \alpha - kg \cos \alpha = a.$$

Ответ. Возможность соскальзывания, т.е. появления ускорения a , не зависит от массы десантника (с грузом он или без), а определяется только соотношением коэффициента трения и угла склона. Соскальзывания нет ($a = 0$) при $k \geq \operatorname{tg} \alpha$.

Примечание. Та же задача относится к транспорту на склоне горы, грузу на наклонной плоскости и т.д. В некоторых случаях (транспорт) в исходное уравнение добавляется сила тяги, но это не вносит принципиальных изменений в метод решения задачи.

1.4. Тягач буксирует орудие с постоянной скоростью (см. рис. 1.14). При каком угле α угроза разрыва троса минимальна, если коэффициент трения при движении орудия равен k ?

Решение. Условие равномерного движения орудия: $F_{\text{тр}} = F \cos \alpha$, где $F_{\text{тр}}$ — сила трения скольжения орудия. С учетом формулы (1.39) получим

$$k(mg - F \sin \alpha) = F \cos \alpha,$$

где m — масса орудия.

Отсюда $F(\cos \alpha + k \sin \alpha) = kmg$, или

$$F = \frac{kmg}{\cos \alpha + k \sin \alpha}.$$

Сила F минимальна при максимальном знаменателе. Приравняем нулю его производную:

$$(\cos \alpha + k \sin \alpha)' = -\sin \alpha + k \cos \alpha = 0.$$

При меньших α производная положительна, при больших — отрицательна, значит, найденный экстремум — максимум.

Ответ. Угроза разрыва троса минимальна при $\operatorname{tg} \alpha = k$.

Примечание. Полученный результат переключается с результатом предыдущей задачи.

1.5. Тренировочный самолет, летящий со скоростью 360 км/ч, выполняет петлю Нестерова (рис. 1.17). При каком ее радиусе пилот массой 75 кг испытает состояние невесомости? Каков его максимальный вес?

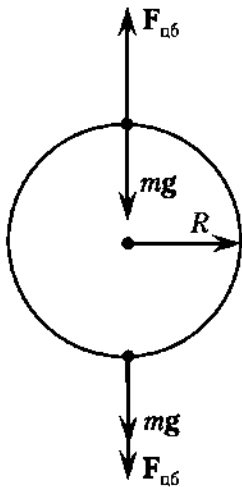


Рис. 1.17

Дано: $v = 360 \text{ км/ч} = 100 \text{ м/с}$; $m = 75 \text{ кг}$.

$R = ?$ $P_{\text{max}} = ?$

Решение. На пилота действуют сила тяжести mg и сила инерции, которую при движении по окружности называют центробежной.

Соответственно, $ma = mg + F_{\text{цб}}$.

В верхней точке траектории эти силы направлены противоположно. Состоянию невесомости соответствует соотношение

$$mg = \frac{mv^2}{R}, \quad (1.53)$$

откуда $R = \frac{v^2}{g}$.

В нижней точке траектории эти силы по направлению совпадают, и потому вес в этой точке максимален:

$$P_{\text{max}} = mg + \frac{mv^2}{R}. \quad (1.54)$$

Подставляя соотношение (1.53) в формулу (1.54), получим $P_{\text{max}} = 2mg$.

Подставляя числовые данные, найдем $R \approx 1020 \text{ м}$, $P_{\text{max}} = 1470 \text{ Н}$.

Задачи для самостоятельного решения

1.6. БТР с незакрепленным грузом на борту тормозит на горизонтальной дороге так, что за 10 с скорость уменьшилась с 72 км/ч до нуля. Коэффициент трения между грузом и поверхностью 0,2. Сдвинется ли груз и как это зависит от его массы?

1.7. Какой максимальный груз можно подвесить к стропам парашюта, которые выдерживают натяжение $7 \cdot 10^4$ Н, если парашют автоматически раскрывается через 2 с после отделения груза от самолета, а после раскрытия за 5 с скорость падения уменьшается до 8 м/с?

1.8. Какова минимальная длина взлетной полосы аэродрома для самолета Ан-22 («Антей»), если его масса 250 т, сила тяги двигателей 214 кН, а минимальная скорость отрыва от земли 162 км/ч? Сопротивлением движению пренебречь.

1.9. Высота круговой орбиты спутника ГЛОНАСС — 19 100 км. С какой скоростью он движется?

1.10. Движение автомобиля на закругленном участке дороги с радиусом кривизны 200 м соответствует уравнению $s = At + Bt^2$, где $A = 5$ м/с, $B = 0,8$ м/с². Через какое время полное ускорение автомобиля станет равным 3 м/с²?

Глава 2

РАБОТА И ЭНЕРГИЯ

Законы природы — это то, что о них известно.

В результате изучения данной главы учащийся должен:

знать

- физическую сущность понятий «работа», «энергия», «импульс»;
- законы сохранения энергии и импульса и их методологические и научно-практические следствия;
- основные законы реактивного движения, упругого и неупругого удара и релятивистской динамики, существенные для конструирования и эксплуатации изучаемых объектов техники и вооружения;

уметь

- распознавать, вычленять и анализировать проявления законов сохранения энергии и импульса в объектах природы и техники;
- формулировать изучаемую военно-техническую задачу с позиций законов сохранения энергии и импульса и применять аппарат теории для ее решения;

владеть

- навыками применения законов взаимопревращения кинетической и потенциальной энергий и сохранения импульса при решении военно-технических задач, сформулированных как физические;
- навыками привлечения физических констант, справочных данных, оценки порядка величин и опоры на их размерности при решении задач механики, связанных с энергией и импульсом системы частиц.

2.1. Работа и энергия

Если сила не совпадает по направлению с перемещением частицы (рис. 2.1), то в соответствии с формулой (1.35)

$$F \cos \alpha = \frac{d(mv)}{dt}. \quad (2.1)$$

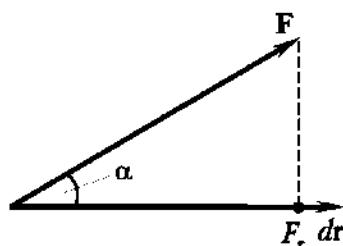


Рис. 2.1

С другой стороны, согласно формуле (1.4), умножив обе части равенства на $v dt = dr$, получим

$$F \cos \alpha dr = v d(mv) = d(mv^2/2). \quad (2.2)$$

Последнее преобразование следует из соотношения $d(v^2) = 2v dv$. Левая часть формулы (2.2) представляет собой скалярное произведение векторов \mathbf{F} и $d\mathbf{r}$, получившее собственное название.

Мера действия силы, определяемая ее скалярным произведением на перемещение, называется **работой**:

$$\delta A = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = (F \cos \alpha) dr = F_r dr = F dr_r, \quad (2.3)$$

где $F_r = F \cos \alpha$ — проекция вектора \mathbf{F} на направление вектора $d\mathbf{r}$ (см. рис. 2.1).

Понятие «работа» ввел механик и математик Д. Бернулли (1700—1782). Формула (2.3) определяет единицу работы джоуль (Дж), названную в честь английского физика Дж. Джоуля (1818—1889): 1 Дж = 1 Н·м.

При $\alpha < \pi/2$ $\delta A > 0$ сила *способствует* движению и называется *движущей силой*. При $\alpha > \pi/2$ $\delta A < 0$ сила направлена *против* движения и является *силой сопротивления*. В этом случае перемещение происходит вопреки действию силы — либо под действием других сил, либо вследствие инерции. Наконец, при $\alpha = \pi/2$ $\delta A = 0$. Например, сила тяготения не производит работу по перемещению спутника Земли, движущегося по круговой орбите.

Формула (2.3) определяет *элементарную* работу δA при перемещении $d\mathbf{r} = d\mathbf{l}$, где $d\mathbf{l}$ — элемент траектории (рис. 2.2). При *конечном* перемещении вычислению работы способствует тот же графический метод, что и при вычислении пути (см. рис. 1.5, 1.6). Как следует из формулы (2.3) и рис. 2.2, элементарная работа численно равна заштрихованной площади. Очевидно, что полная работа на пути от 0 до l_1 равна сумме таких миниплощадей:

$$A = \delta A_1 + \delta A_2 + \dots + \delta A_n = \sum_{i=1}^n \delta A_i = \sum_{i=1}^n F_{r_i} dl_i = F_r l_1.$$

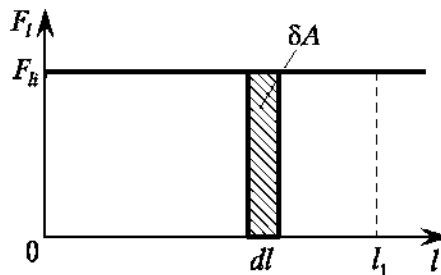


Рис. 2.2

Если по мере движения сила F_r *изменяется* (рис. 2.3), то тот же принцип вычисления осуществляют *интегрированием*:

$$A = \int_0^{l_1} F_r dl. \quad (2.4)$$

В зависимости от функции $F_r(l)$ интегрирование может оказаться сложным, но результат можно получить гораздо проще, пользуясь правой частью формулы (2.2). Она представляет собой приращение физической величины $mv^2/2$, также получившей собственное название.

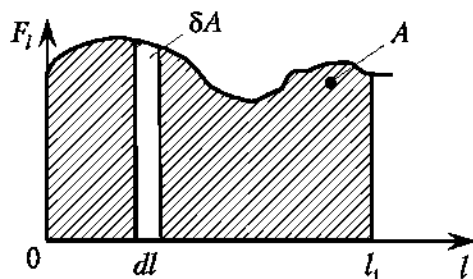


Рис. 2.3

Мера движения тела, равная работе, которую нужно совершить для его полной остановки, называется **кинетической энергией**.

Понятие о кинетической энергии ввел немецкий физик (и физиолог) Г. Л. Ф. Гельмгольц (1821–1894).

Возникает вопрос: почему произведены именно такие преобразования выражения (2.1), а не иные? Дело в том, что они привели к выражениям, отражающим одну из фундаментальных особенностей природы. Если нужно знать, как деформировать пружину затвора, чтобы получить требуемую скорость бойка, или сколько сжечь бензина, чтобы проехать 100 км, то для перехода одних форм движения материи в другие нужна *общая мера*. Подобно этому деньги являются эквивалентом экономики для станка, хлеба и кинофильма.

Мерой преобразования форм движения материи является **энергия**.

Существуют механическая, химическая, тепловая, ядерная и другие формы энергии. Каждую из них характеризует своя комбинация физических величин, однако *сумма таких комбинаций при любых преобразованиях остается постоянной*, что дает возможность количественных сопоставлений.

Как следует из формулы (2.2), *работа силы приводит к приращению кинетической энергии*, и наоборот: *работа, которую производит движущееся тело, равна убыли его кинетической энергии*. Поэтому если известна кинетическая энергия частицы, например в точках $l_0 = 0$ и $l = l_1$ (см. рис. 2.3), то значительно проще определить разность ее значений в начале и в конце интервала, чем вычислить интеграл (2.4) от сложной функции.

Примеры практики

Преобразование работы в кинетическую энергию осуществляет огнестрельное оружие: дульная энергия снаряда (его энергия при вылете из ствола) равна работе пороховых газов. Если пренебречь энергией вращательного движения снаряда, то начальную скорость поступательного движения нетрудно рассчитать. Если p — среднее давление газов, l — длина канала ствола, d — калибр оружия (внутренний диаметр ствола), m и v_0 — масса и скорость снаряда при вылете из ствола, то $m(v_0)^2/2 = plnd^2/4$. Отсюда, в частности, $v_0 \sim 1/\sqrt{m}$, что учитывают, например, в бронебойном оперенном подкалиберном снаряде (БОПС). Он представляет собой сердечник, который во время разгона в стволе удерживается в оболочке, соответствующей калибру оружия, но при вылете из ствола оболочка срывается набегающим потоком воздуха или центробежной силой (в нарезном оружии). За счет меньшей, чем у обычного снаряда, массы скорость сердечника в полтора-два раза превышает скорость обычных снарядов, а сопротивление воздуха при полете становится гораздо меньше. Такие снаряды имеют малое полетное время, высокую кучность боя и лучше пробивают броню.

Во многих случаях важна не только осуществляемая устройством работа, но и *скорость* ее выполнения, которая характеризуется мощностью:

$$P = \frac{dA}{dt} = Fv \cos \alpha. \quad (2.5)$$

Последнее выражение следует из формул (2.3) и (1.4). Оно удобно, например, для определения силы тяги и максимальной скорости по мощности ракетного двигателя. Из формулы (2.5) следует и единица мощности **ватт** (Вт): 1 Вт = 1 Дж/с. До сих пор применяется и такая внесистемная единица, как лошадиная сила (1 л.с. \approx 736 Вт): мощность автомобильного двигателя $\sim 10^2$ л.с., атомохода — 10^5 л.с. и т.д.

2.2. Потенциальная энергия

Работа может привести к приращению не только кинетической энергии. Пусть тело массой m под действием внешней силы $\mathbf{F} = -m\mathbf{g}$ поднято с высоты h_1 на высоту h_2 (рис. 2.4), причем в обоих положениях кинетическая энергия равна нулю. Что же изменилось? В соответствии с формулой (2.4), учитывая, что $F_t = F = \text{const}$, получим

$$A = mg(h_2 - h_1) = mgh_2 - mgh_1 = \Delta(mgh). \quad (2.6)$$

Если на высоте h_2 тело отпустить, то работу произведет теперь уже сила тяжести:

$$A' = mgh_2 - mgh_1 = \Delta(mgh). \quad (2.7) \quad \text{Рис. 2.4}$$

Как видим, $A' = A$, т.е. работа, произведенная внешней силой, «возвращена» работой силы тяжести. Это дает основание считать величину mgh *энергией*. Ее особенность в том, что при наличии опоры или подвеса тело может как угодно долго находиться на уровне h_2 , и энергия mgh_2 никак проявляться не будет — существует лишь законсервированная, *потенциальная, возможность* ее проявления. Поэтому mgh называют **потенциальной энергией**, а силу тяготения — **консервативной силой**. Понятие о потенциальной энергии ввел немецкий математик К.-Ф. Гаусс (1777–1855).

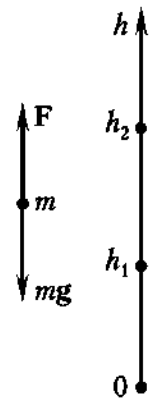
Потенциальная энергия характеризует работу по изменению относительного положения тел в поле консервативных сил.

В данном случае она определяется относительным положением тела и Земли, но может иметь и иную природу.

Примеры практики

Преобразование потенциальной энергии тяготения в кинетическую энергию и работу применяют при забивании свай, ковке, штамповке и т.д. Действие артиллерии и бомбометание также основаны на использовании потенциальной энергии тяготения, хотя разрушительная работа бомб и снарядов много больше, чем болванки той же массы. Это свидетельствует о том, что кроме потенциальной энергии *тяготения* в телах может быть запасена потенциальная энергия иного вида.

Полезность комбинации mgh может показаться сомнительной из-за неопределенности высоты h , которая зависит от начала ее отсчета. Если поло-



жить $h = 0$ на дне Марианской впадины или на вершине Джомолунгмы, то потенциальные энергии летящего вертолета будут различаться существенно. Однако в соответствии с формулой (2.7) работа определяется не высотой, а ее *изменением*, которое от положения начала отсчета на рис. 2.4 никак не зависит.

Другой важный вопрос: как работа зависит от формы траектории?

Рассмотрим элементарные перемещения снаряда dl_1 и dl_2 (рис. 2.5). В соответствии с формулой (2.3) $\delta A = (mg \cos \alpha) dl$. Поскольку $dl_1 \cos \alpha_1 = dl_2 \cos \alpha_2 = -dh$ (перемещение dl проецируется на ось h в сторону *убыли* высоты), то *от направления перемещения элементарная работа не зависит*:

$$\delta A = -mg dh. \quad (2.8)$$

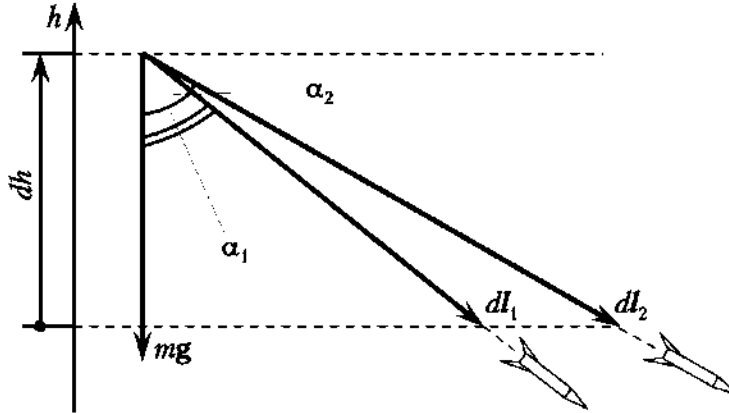


Рис. 2.5

Любые *конечные* траектории, например BCD и BED (рис. 2.6), можно с помощью близких друг к другу горизонтальных плоскостей разбить на элементарные участки, для которых попарно справедливо равенство (2.8). Тогда работа на *всей* траектории BD , независимо от положения промежуточных точек, определяется формулой (2.6):

$$A_{BD} = - \int_{h_B}^{h_D} mg dh = -mg \int_{h_B}^{h_D} dh = mg(h_B - h_D) = mg \Delta h. \quad (2.9)$$

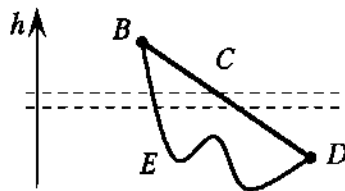


Рис. 2.6

Работа консервативной силы тяжести по перемещению тела равна *убыли* его потенциальной энергии, не зависит от формы траектории (*и длины пути*) и *определяется только начальной и конечной высотой тела*.

Это, однако, не означает, что траектория вообще не имеет никакого значения.

Примеры практики

В формуле (1.50) функция $\sin 2\varphi$ имеет одинаковые значения, например при $\varphi = 30^\circ$ и $\varphi = 60^\circ$, т.е. дальность полета снаряда может быть одинаковой при разных траекториях, которые в таких случаях называют *сопряженными* (рис. 2.7). Если

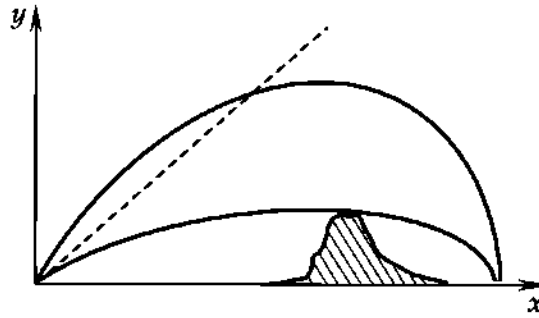


Рис. 2.7

угол φ меньше угла наибольшей дальности, траекторию называют *настильной*, если больше — *навесной*. При стрельбе из стрелкового оружия и гранатометов используют настильные траектории, а в артиллерии крутизна траектории снаряда возрастает в следующей последовательности: пушка — гаубица — миномет. При этом укрытия создают «мертвое пространство», в пределах которого поражение цели невозможно (см. рис. 2.7). В таких случаях применяют мины, летящие по навесным траекториям. Их разработка связана с именем русского генерала Л. Н. Гобято, создавшего прообраз миномета в виде металлической трубы, крепившейся к деревянной колоде. С помощью такого изобретения ему удалось сорвать замысел японцев при обороне Порт-Артура (Русско-японская война 1904–1905 гг.).

Переместим тело от D к B (см. рис. 2.6). Поскольку элементарная работа $\delta A = -mgdh$, то

$$A_{DB} = -mg \int_{h_D}^{h_B} dh = -mg\Delta h. \quad (2.10)$$

Из формул (2.9), (2.10) следует, что $A_{BD} + A_{DB} = 0$:

$$m\oint gdl = m\oint gdh = 0, \quad (2.11)$$

где \oint означает интеграл по замкнутому контуру, а $\oint gdl$ называется *циркуляцией вектора \mathbf{g}* (по замкнутому контуру). Итак, *работа силы тяжести на замкнутой траектории равна нулю*.

Это свойство относится ко всем консервативным силам независимо от их природы. Поскольку $m \neq 0$, равенство (2.11) определяется выражением

$$\oint gdl = 0. \quad (2.12)$$

Равная нулю циркуляция означает, что поле не образует вихрей — замкнутых линий. Таким свойством отличаются потенциальные поля, которые более детально будут рассмотрены в параграфе 5.3 на примере электростатического поля.

Потенциальную энергию иной природы можно обнаружить при совершении работы по растяжению пружины. Координаты ее торца изменяются от $x_0 = 0$ до x :

$$A = \int_0^x \mathbf{F}dx = k \int_0^x xdx = \frac{kx^2}{2} = E_{\text{п}}, \quad (2.13)$$

где использовано равенство (1.37). В отличие от формулы (2.12) сила здесь зависит от координаты, поэтому интеграл чуть сложнее. *Упругая сила так-*

же является консервативной, и потому потенциальная энергия упругой деформации $E_{\text{п}} = kx^2/2$ также может быть преобразована в работу. Как и при перемещении в поле тяготения, по какой именно траектории была растянута пружина, значения не имеет.

Из рассмотренных примеров может сложиться ложное впечатление, что работа против *любых* сил не зависит от формы траектории и приводит к накоплению потенциальной энергии, однако это далеко не так. Пусть тело переместили от x_1 до x_2 , преодолевая силу трения скольжения $F = k_c N$. Тогда произведенная работа

$$A = k_c N(x_2 - x_1) = k_c N x_2 - k_c N x_1.$$

Можно ли $k_c N x$ считать потенциальной энергией? Способ проверки тот же: отпустим тело при его новой координате x_2 и обнаружим, что ничего не происходит: система не возвращается в исходное состояние, совершая работу.

ВОПРОС. Куда исчезла совершенная работа?

ОТВЕТ. Она пошла на разрыв связей между атомами и сообщение им энергии: работа преобразовалась в *теплоту*.

Силы, подобные трению, рассеивают энергию направленного движения и называются **диссипативными** (лат. *dissipatio* — рассеяние).

2.3. Система частиц

Любые преобразования энергии — это результат *взаимодействия* как минимум двух частиц (тел). Их совокупность составляет **систему частиц**. Если на частицы системы внешние воздействия отсутствуют, они друг друга компенсируют или ими можно пренебречь, то система называется **замкнутой**, или **изолированной**. Силы, действующие между частицами системы, называют **внутренними**. Солнечную систему можно приближенно считать замкнутой, так как внешние силы значительно меньше внутренних. В момент взрыва гранаты ее осколки также образуют замкнутую систему, так как внутренние силы много больше сил тяготения и сопротивления воздуха.

Масса, импульс, кинетическая и потенциальная энергия системы определяются суммированием соответствующих характеристик ее частиц:

$$m = \sum_i m_i; \quad \mathbf{P} = \sum_i \mathbf{p}_i; \quad E_{\text{к}} = \sum_i E_{\text{ки}}; \quad E_{\text{п}} = \sum_i E_{\text{пi}}. \quad (2.14)$$

Сумма кинетической и потенциальной энергий системы составляет ее **полную механическую энергию**:

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}}. \quad (2.15)$$

В простейшем случае система состоит из двух частиц, положение которых определяется одной координатой (рис. 2.8). Импульс такой системы

$$\mathbf{P} = m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2. \quad (2.16)$$

Разделив обе части равенства на массу системы, получим

$$\frac{\mathbf{P}}{m_1 + m_2} = \mathbf{v}_c = \frac{m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2}{m_1 + m_2}, \quad (2.17)$$

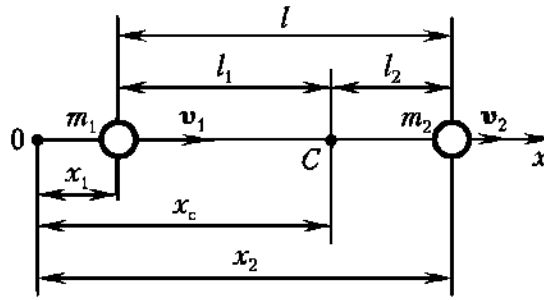


Рис. 2.8

так как величина $\mathbf{P}/(m_1 + m_2)$ имеет размерность скорости. Отсюда следует равенство $(m_1 + m_2)\mathbf{v}_c = m_1\mathbf{v}_1 + m_2\mathbf{v}_2$, что выявляет физический смысл скорости \mathbf{v}_c . Если вообразить, что вся масса системы сосредоточена в некоей точке C , имеющей скорость \mathbf{v}_c , то она будет иметь импульс, равный импульсу системы! Эта воображаемая точка называется **центром инерции системы**, и в ней необязательно находится какая-то масса. Пример — обруч.

Система в целом движется так, как ее центр инерции.

ВОПРОС. Где именно находится эта замечательная точка?

ОТВЕТ. Умножив обе части соотношения (2.17) на Δt , получим

$$\Delta x_c = \frac{m_1 \Delta x_1 + m_2 \Delta x_2}{m_1 + m_2},$$

где Δx_c — приращение координаты центра инерции C системы. Перейдя от приращений к самим координатам, найдем

$$x_c = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2}; \quad \frac{m_1}{m_2} = \frac{x_2 - x_c}{x_c - x_1}.$$

Сопоставив эти формулы с рис. 2.8, приходим к выводу: *центр инерции C делит расстояние l между частицами системы на отрезки, обратно пропорциональные их массам.* Поскольку частиц и их координат может быть множество, то положение центра инерции в обобщенном виде

$$\mathbf{r}_c = \frac{m_1 \mathbf{r}_1 + m_2 \mathbf{r}_2 + \dots + m_n \mathbf{r}_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n m_i \mathbf{r}_i; \quad (2.18)$$

$$\mathbf{v}_c = \frac{d\mathbf{r}_c}{dt} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \mathbf{p}_i = \frac{1}{m} \mathbf{P}. \quad (2.19)$$

2.4. Закон сохранения механической энергии

Пусть на частицы 1, 2 системы действуют внутренние *консервативные* силы $\mathbf{f}_{12} = -\mathbf{f}_{21}$ и внешние силы $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2$. Их работа приводит к приращению кинетической энергии частиц:

$$\mathbf{f}_{12} d\mathbf{l}_1 + \mathbf{F}_1 d\mathbf{l}_1 = dE_{k1},$$

$$\mathbf{f}_{21} d\mathbf{l}_2 + \mathbf{F}_2 d\mathbf{l}_2 = dE_{k2}.$$

Складывая эти равенства почленно, получим

$$(\mathbf{f}_{12} d\mathbf{l}_1 + \mathbf{f}_{21} d\mathbf{l}_2) + \sum_{i=1}^2 \mathbf{F}_i d\mathbf{l}_i = \sum_{i=1}^2 dE_{ki}. \quad (2.20)$$

В скобках — работа консервативных сил системы, которая в соответствии с формулой (2.10) равна убыли ее потенциальной энергии. Второй член — работа $\delta A_{\text{вн}}$ внешних сил, а правая часть (2.20) — это приращение кинетической энергии системы:

$$-dE_{\text{п}} + \delta A_{\text{вн}} = dE_{\text{к}}, \quad d(E_{\text{к}} + E_{\text{п}}) = \delta A_{\text{вн}}. \quad (2.21)$$

Если частиц больше, то больше исходных равенств, но результат тот же. Итак, *если между частицами системы действуют только консервативные силы, то приращение ее полной механической энергии равно работе внешних сил.*

Этот закон регулирует поведение множества систем, например течение жидкости. Если не учитывать трение, то между сечениями S_1 и S_2 трубы она движется под действием результирующей силы $\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$ (рис. 2.9). В границах S'_1, S'_2 ее энергия не изменяется, а изменение энергии ее порции Δm определяется работой внешних сил \mathbf{F}_1 и \mathbf{F}_2 на границах участка.

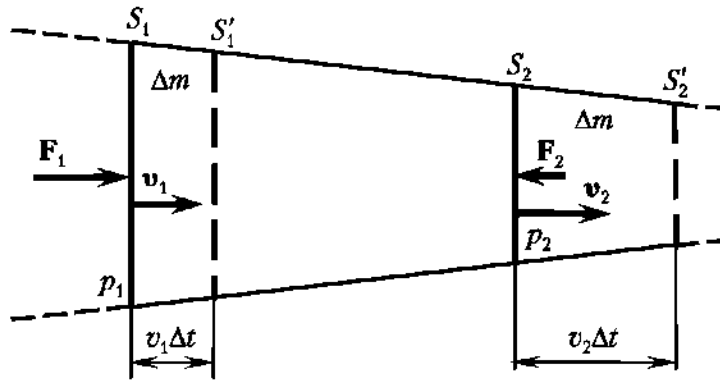


Рис. 2.9

На основании формулы (2.21) при $dE_{\text{п}} = 0$ (труба горизонтальная) имеем

$$\frac{\Delta m v_2^2}{2} - \frac{\Delta m v_1^2}{2} = p_1 S_1 v_1 \Delta t - p_2 S_2 v_2 \Delta t. \quad (2.22)$$

Здесь учтено, что Δt мало, и потому на расстояниях $v_1 \Delta t$ и $v_2 \Delta t$ давление и сечение трубы практически постоянны.

При стационарном течении масса Δm жидкости, протекающей через сечение S_1 за время Δt , равна массе жидкости, протекающей за то же время через сечение S_2 (см. рис. 2.9):

$$\Delta m = \rho_1 S_1 v_1 \Delta t = \rho_2 S_2 v_2 \Delta t. \quad (2.23)$$

Отсюда

$$S_1 v_1 = S_2 v_2, \quad (2.24)$$

поскольку для несжимаемой жидкости $\rho_1 = \rho_2 = \rho$. Равенство (2.24) называется **уравнением непрерывности струи**.

Подставляя соотношения (2.23) и (2.24) в формулу (2.22), получим **уравнение Бернулли**

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}. \quad (2.25)$$

Оно относится не только ко всему сечению трубы, но и к любой трубке тока в объеме текущей жидкости. Под ней понимают объем, ограниченный

линиями тока, касательные к которым совпадают с направлениями скоростей частиц жидкости.

Уравнение (2.25) показывает, что в сечениях потока с повышенной скоростью давление падает. Как следует из равенства (2.24), это происходит, например, в сужениях трубы.

Уравнение Бернулли имеет множество технических применений (пульверизация, сопла турбин, конструкции летательных аппаратов и т.д.). На рис. 2.10 показано сечение крыла самолета, разветвляющего струю воздуха. По его выпуклой части он за то же время проходит больший путь, т.е. имеет большую скорость, что соответствует меньшему давлению. Разность давлений и вызывает подъемную силу.

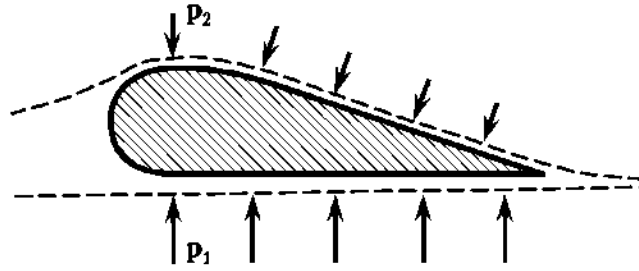


Рис. 2.10

Если система частиц замкнута, то в уравнении (2.21) $\delta A_{\text{вн}} = 0$, $d(E_k + E_p) = 0$ и, следовательно,

$$E = E_k + E_p = \text{const}, \quad (2.26)$$

т.е. если между частицами замкнутой системы действуют только консервативные силы, то ее полная механическая энергия остается постоянной.

Именно этот закон и отражает универсальность понятия «энергия» для разных форм движения материи. В данном, частном, случае он называется **законом сохранения механической энергии** (одним из его первооткрывателей был Дж. Джоуль).

Примеры практики

Для того чтобы ракета освободилась от тяготения Земли, ее стартовая кинетическая энергия должна быть не меньше приращения потенциальной энергии ракеты при удалении с поверхности Земли на бесконечность:

$$\frac{mv^2}{2} = \int_{R_3}^{\infty} \gamma \frac{mM_3}{r^2} dr = \gamma \frac{mM_3}{R_3}, \quad v = \sqrt{\frac{2\gamma M_3}{R_3}} = \sqrt{2gR_3} \approx 11 \text{ км/с}. \quad (2.27)$$

Это значение называется **второй космической скоростью**. Им руководствуются при проектировании межпланетных перелетов.

При бросании различных снарядов их начальная кинетическая энергия преобразуется в потенциальную, а затем происходит обратное преобразование. Пружина затвора стрелкового оружия осуществляет преобразование энергии упругой деформации в кинетическую энергию бойка: $kx^2/2 = mv^2/2$. Как следует из этой формулы, получаемая кинетическая энергия пропорциональна упругой силе и абсолютной деформации. Именно поэтому в древности перешли от лука к арбалету. Упругая сила и натяжение лука определяются ограниченными физическими возможностями человека, а для натяжения упругих элементов арбалета применяют дополнительные приспособления — рычаги, ворота и т.п.

Подчеркнем, что в формулах (2.21), (2.26) не учтены силы трения. Будучи *неконсервативными*, они нарушают сохранение *механической* энергии, поскольку часть ее переходит в теплоту, однако сумма тепловой и механической энергий дает ту же константу. Какие бы формы энергии ни присутствовали в системе, их сумма неизменна.

Энергия не уничтожается и не создается, а только перераспределяется между элементами материи, переходя из одной формы в другую.

Закон сохранения энергии как бы «сшивает» их друг с другом.

2.5. Закон сохранения импульса

Возможны и другие преобразования характеристик системы частиц (см. рис. 2.8), которые приводят к не менее важным результатам. В соответствии с формулой (1.35)

$$\frac{d\mathbf{p}_1}{dt} = \mathbf{f}_{12} + \mathbf{F}_1; \quad \frac{d\mathbf{p}_2}{dt} = \mathbf{f}_{21} + \mathbf{F}_2.$$

Сложим эти равенства почленно. С учетом соотношения $\mathbf{f}_{12} = -\mathbf{f}_{21}$ и формулы (2.19) получим

$$\frac{d(\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)}{dt} = \frac{d\mathbf{P}}{dt} = \sum_i \mathbf{F}_i = m\mathbf{a}_c, \quad (2.28)$$

где m — масса системы; \mathbf{a}_c — ускорение центра инерции. Таким образом, *скорость изменения импульса системы равна сумме внешних сил.*

Если внешние силы отсутствуют или компенсируют друг друга, то $d\mathbf{P}/dt = 0$, т.е.

$$\mathbf{P} = m_1\mathbf{v}_1 + m_2\mathbf{v}_2 + \dots = \text{const}, \quad (2.29)$$

где число частиц в системе не ограничено. Формула (2.29) выражает **закон сохранения импульса**: *при любых происходящих в ней процессах импульс замкнутой системы частиц остается постоянным.*

Как и закон сохранения энергии, он выполняется и в космосе, и в микромире.

В проекции на любое направление x равенство (2.28) принимает вид $dP_x/dt = \sum_i F_{ix}$. Если правая его часть равна нулю, то

$$P_x = \sum_i m_i v_{ix} = \text{const}, \quad (2.30)$$

где P_x — составляющая импульса системы по оси x .

Если результирующая сила по какому-либо направлению равна нулю, то составляющая импульса системы по этому направлению остается постоянной.

В таком виде закон сохранения импульса выполняется и для *незамкнутых систем*.

ВОПРОС. В замкнутой системе «пешеход — Земля» $m_n\mathbf{v}_n + m_3\mathbf{v}_3 = 0$. Если пешеход начинает движение со скоростью \mathbf{v}_n , то почему незаметна скорость \mathbf{v}_3 ?

ОТВЕТ. Потому что $v_3/v_n = m_n/m_3$, т.е. v_3 ничтожно мала. Кроме того, разнонаправленные импульсы, придаваемые Земле миллиардами пешеходов, компенсируют друг друга.

Примеры практики

Полученный вывод относится и к транспорту, движение которого обусловлено своеобразным «отталкиванием» колес или гусениц от поверхности Земли. По небольшому шару в космосе мы двигались бы куда менее успешно.

Реактивное действие *соизмеримых* масс используют с давних пор: вращающиеся головки фейерверков Древнего Китая, движимый паром шар Герона Александрийского (I в.), сегнерово колесо (XVII в.) и т.д. Такие решения применяют и в реактивных соплах систем стабилизации угловой скорости летательных аппаратов. Закон сохранения импульса используют и как основу *непрерывного* движения. Когда парашютист подтягивает стропы в сторону требуемого бокового сноса, то воздух истекает преимущественно с противоположной стороны купола. Это и создает горизонтальную реактивную тягу.

Если пулмет стоит на тележке, то она катится в сторону, противоположную направлению стрельбы. Пули можно заменить любыми составляющими системы, например осьминоги, кальмары и медузы используют воду. Кальмар с силой проталкивает ее через особое отверстие в своем теле и в результате движется толчками назад (со скоростью до ~ 70 км/ч). Водометные движители судов, а также плавающей колесной и бронетанковой техники выталкивают воду через выпускное отверстие в корме.

Однако наиболее впечатляющие достижения получены все же не на воде.

Исторический экскурс

В 1687 г. Ньютон высказал предположение, что машины могут двигаться на основе закона сохранения импульса, в том числе и в безвоздушном пространстве, а простейшие пороховые ракеты изобрели еще в Древнем Китае и применяли при осаде укреплений. Для аналогичных целей их использовали индусы в XVIII в., опыт которых переняли затем англичане: в войне с Наполеоном с помощью сотен ракет, запущенных с кораблей, им удалось сжечь Булонский порт.

Первый в мире проект реактивного *летательного* аппарата разработал в XIX в. русский революционер-народоволец Н. И. Кибальчич (1853–1881). С середины XIX в. ракеты были вытеснены ствольной артиллерией, но затем возродились. В начале XX в. К. Э. Циолковский (1857–1935) заложил основы теории реактивного двигателя. В 1957 г. под руководством С. П. Королева запущен искусственный спутник Земли, а затем и корабль с космонавтом Ю. А. Гагариным на борту (1961). Велики достижения и американских ученых, инженеров и астронавтов. В частности, Н. Армстронг и Э. Олдрин впервые совершили посадку на Луну (1969).

Закономерности реактивных полетов следуют из формулы (2.30). При взаимодействии двух тел системы

$$m_1 \mathbf{v}_1 = -m_2 \mathbf{v}_2. \quad (2.31)$$

Массы m_1 и m_2 возникают в ракете в результате разделения ее составляющих: продукты сгорания топлива убывают из общей массы системы в виде газовой струи.

Пусть ракета массой m имеет относительно Земли скорость \mathbf{v} , а газы истекают со скоростью \mathbf{u} относительно ее корпуса, т.е. со скоростью $\mathbf{v} - \mathbf{u}$ относительно Земли. За время dt ракету покидает газ массой dm , ее скорость возрастает на $d\mathbf{v}$, но общий импульс системы остается постоянным (рис. 2.11):

$$m\mathbf{v} = (m - dm)(\mathbf{v} + d\mathbf{v}) + (\mathbf{v} - \mathbf{u})dm.$$

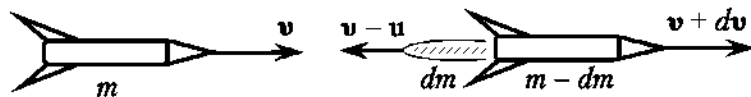


Рис. 2.11

Пренебрегая членом $dm dv$ как бесконечно малой второго порядка, получим

$$m dv - u dm = 0.$$

В проекции на направление вектора v это равенство приобретает вид

$$m dv + u dm = 0. \quad (2.32)$$

Разделяя переменные и интегрируя, получаем

$$\int_0^v dv = -u \int_{m_0}^m \frac{dm}{m},$$

откуда

$$v = u \ln \frac{m_0}{m}. \quad (2.33)$$

Из этой формулы, полученной К. Э. Циолковским, следует, что для достижения первой космической скорости $7,9$ км/с начальная масса m_0 ракеты с топливом должна быть в десятки раз больше конечной ее массы m (без топлива) на орбите. При этом масса m_0 зависит от скорости u , которая, в свою очередь, определяется составом топлива, конструкцией сопла и т.д. Отсюда же следует необходимость сброса отработавших ступеней для уменьшения разгоняемой массы.

Из формулы (2.32) также следует соотношение

$$m \frac{dv}{dt} = -u \frac{dm}{dt}.$$

Поскольку левая часть равенства представляет собой силу, то правая часть имеет ту же размерность. Она называется **реактивной силой**:

$$F_p = u \frac{dm}{dt}.$$

Сомножитель dm/dt называют **массовым секундным расходом топлива**. Если, помимо реактивной, на систему действует внешняя сила F , например сила сопротивления воздуха, то

$$\frac{m dv}{dt} = F - u \frac{dm}{dt}. \quad (2.34)$$

Это **уравнение Мещерского** описывает движение тела с переменной массой и широко используется в ракетной технике, где имя И. В. Мещерского (1853—1935) по праву стоит рядом с именем К. Э. Циолковского.

Исторический экскурс

Полет первого реактивного самолета (немецкого «хейнкеля») состоялся в 1939 г. В СССР до Второй мировой войны на истребителях устанавливали неуправляемые реактивные снаряды. В 1941 г. была принята на вооружение многозаряд-

ная реактивная установка на автомобильном шасси, названная (из соображений секретности) «гвардейским минометом». Первое боевое применение «Катюши» состоялось 14.07.1941 (батарея капитана Флерова). Подобные системы залпового огня развиваются и в наше время («Град», «Ураган», «Смерч» и др.).

Реактивные двигатели различаются способом образования газов. В самолетных и ракетных пороховых реактивных двигателях (ПРД), как и в огнестрельном оружии, топливо содержит и горючее, и окислитель. Идею жидкостного реактивного двигателя (ЖРД) еще в 1920 г. высказал советский инженер Ф. А. Цандер (1887—1933), реализовав ее в начале 1930-х гг. на бензине и жидком кислороде.

Современные ЖРД содержат керосин или спирт и отдельно подаваемый окислитель — кислородосодержащее вещество. Именно ПРД и ЖРД превратили мечты о космических полетах в реальные проекты.

Воздушно-реактивные двигатели (ВРД) в качестве окислителя используют кислород воздуха. В прямоточном ВРД (ПВРД) атмосферный воздух сжимается скоростным напором самого двигателя, поэтому в отсутствие скорости такой самолет взлетать не может. Этого недостатка лишен турбореактивный двигатель (ТРД) — его компрессор засасывает и сжимает воздух. При достижении скорости $\sim 2M$ (M — число Маха, равное отношению скорости тела к скорости звука) необходимость в компрессоре отпадает — встречное давление воздуха уже достаточно велико.

Современная ракетная техника — основа тактического и стратегического оружия классов «земля — воздух», «воздух — земля», «воздух — воздух». Наиболее грозное оружие — межконтинентальные баллистические ракеты наземного, морского и подводного базирования. В последние годы все большее распространение получают и портативные системы: противотанковые управляемые ракеты (ПТУР) и переносные зенитно-ракетные комплексы (ПЗРК).

Проявление и использование закона сохранения импульса в ВВТ не ограничено ракетной техникой.

Примеры практики

1. Для нагревания термоядерного топлива используют его объемный обжим путем взрыва обычного ядерного заряда. Рентгеновское излучение взрыва испаряет свинцовую оболочку, и она, разлетаясь радиально, создает центростремительную реактивную силу. Адиабатное сжатие (в несколько тысяч раз) приводит к нагреванию термоядерного топлива до температур $\sim 10^7$ К, которых достаточно для начала реакции синтеза (см. параграф 11.5).

Аналогичную технологию применяют в проектах управляемой термоядерной реакции. Лучи десятков мощных лазеров с разных сторон фокусируют на оболочке диаметром ~ 1 мм, содержащей смесь дейтерия и трития. Мгновенно испарившаяся оболочка приводит к сжатию и разогреву смеси (см. параграф 5.9).

2. Оружие приобретает импульс, противоположный направлению вылета снаряда. Энергия такой отдачи наращивается и после вылета снаряда: истекая из ствола, пороховые газы еще на некотором расстоянии продолжают на него действовать. В ручном стрелковом оружии масса затвора много больше массы пули. Поэтому при отдаче он движется достаточно медленно, чтобы не допустить прорыва газов в обратную сторону, пока пуля находится в стволе. Энергия отдачи (~ 20 Дж) вызывает утомляемость человека при длительной стрельбе.

В артиллерии принято считать, что энергия отдачи составляет $\sim 3\%$ от дульной энергии снаряда. Это огромная величина, но лафет позволяет ее гасить и даже

использовать ее часть для перезарядки. Остальная энергия теряется, что уменьшает КПД оружия. В миномете, например, вся энергия отдачи гасится амортизатором. В артиллерии отдачу уменьшают с помощью так называемых дульных тормозов: истекающие из ствола газы ударяют о поперечные выступы, изменяют направление движения и выходят через специальные каналы.

В безоткатных орудиях (идея возникла еще в Первую мировую войну) часть вызывающих отдачу пороховых газов выводится в направлении, обратном направлению движения снаряда. Это создает силу реакции, которая направлена вперед! Такие орудия не нуждаются в массивном лафете, содержащем громоздкое противооткатное устройство. Тот же принцип используют и в современных ручных противотанковых гранатометах.

Законы сохранения энергии и импульса выполняются всегда. Если обнаруживается их «нарушение», то это служит мотивом поиска неучтенных явлений или тел. На этом пути теория предсказала, например, наличие планеты Нептун (1846 г.) и частицы нейтрино (см. параграф 11.2). С другой стороны, если законы сохранения запрещают какие-либо процессы, то они не происходят никогда.

2.6. Удар

Законы сохранения определяют результат всевозможных ударов — пресса в заготовку, снаряда — в танк, пули — в мишень и т.д. Удары молекул газа о поверхность создают давление, их удары друг о друга приводят к выравниванию плотности и температуры, а также к химическим реакциям, возбуждению, ионизации и т.д.

Ударом называют кратковременное взаимодействие тел (частиц), при котором силы взаимодействия много больше внешних.

Отсюда следует, что систему соударяющихся частиц можно считать *замкнутой*.

Если частицы сближаются по линии, соединяющей их центры инерции, то удар называется **центральный**. Результат удара зависит от его вида.

Удар, после которого тела разлетаются, сохраняя свою форму и внутреннее состояние, называется **упругим**.

В момент такого удара (например, бильярдных шаров) кинетическая энергия относительного движения тел полностью превращается в потенциальную энергию их упругой деформации, а она производит затем работу по восстановлению формы тел.

Пусть частица с массой m_1 движется со скоростью \mathbf{v}_{10} , а частица m_2 — со скоростью \mathbf{v}_{20} (рис. 2.12, а). Поскольку при упругом ударе потерь механической энергии нет, то выполняются оба закона сохранения — импульса и механической энергии:

$$\begin{cases} m_1 \mathbf{v}_{10} + m_2 \mathbf{v}_{20} = m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2, \\ \frac{m_1 v_{10}^2}{2} + \frac{m_2 v_{20}^2}{2} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2}, \end{cases} \quad (2.35)$$

где $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ — скорости тел после удара (рис. 2.12, б). Решив эту систему уравнений, получим

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_1 &= \frac{1}{m_1 + m_2} [2m_2 \mathbf{v}_{20} + (m_1 - m_2) \mathbf{v}_{10}], \\ \mathbf{v}_2 &= \frac{1}{m_1 + m_2} [2m_1 \mathbf{v}_{10} + (m_2 - m_1) \mathbf{v}_{20}]. \end{aligned} \quad (2.36)$$

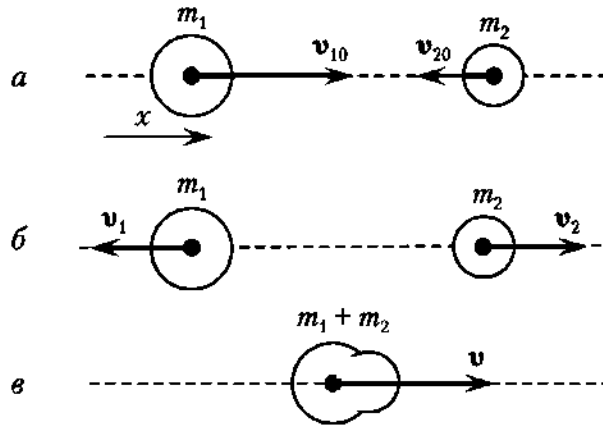


Рис. 2.12

При $m_1 = m_2$ получаем $\mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_{20}$, $\mathbf{v}_2 = \mathbf{v}_{10}$, т.е. тела обмениваются скоростями, что наблюдается, например, при центральном ударе упругих шаров (такой удар изучают в лабораторном практикуме). Если же частица ударяет о стенку или болванка — о броню танка, то $m_1 \ll m_2$, $v_{20} = 0$. Тогда $v_2 \approx 0$, $\mathbf{v}_1 = -\mathbf{v}_{10}$, т.е. стенка (или броня танка) остается практически неподвижной, а частица отражается с той же по модулю и противоположной по направлению скоростью. Из закона сохранения импульса получаем

$$m_1 \mathbf{v}_{10} = -m_1 \mathbf{v}_{10} + \mathbf{p}_{\text{ст}},$$

откуда импульс, полученный стенкой:

$$\mathbf{p}_{\text{ст}} = 2m_1 \mathbf{v}_{10}. \quad (2.37)$$

Рассмотрим теперь случай «слипания» частиц (рис. 2.12, в).

Удар, при котором кинетическая энергия относительного движения тел преобразуется во внутреннюю энергию системы, называется **неупругим**.

Абсолютно неупругих, как и абсолютно упругих ударов, разумеется, не существует: в ударе одного вида могут присутствовать элементы другого.

На основании формулы (2.30) имеем

$$m_1 \mathbf{v}_{10} + m_2 \mathbf{v}_{20} = (m_1 + m_2) \mathbf{v}.$$

Проецируя это равенство на направление вектора \mathbf{v}_{10} и полагая, что вектор \mathbf{v} сонаправлен с вектором \mathbf{v}_{10} , получим

$$m_1 v_{10} - m_2 v_{20} = (m_1 + m_2) v, \quad v = \frac{m_1 v_{10} - m_2 v_{20}}{m_1 + m_2}. \quad (2.38)$$

В зависимости от знака числителя $v > 0$ или $v < 0$. В последнем случае предположение о направлении вектора \mathbf{v} ошибочно.

Во многих случаях, особенно в военном деле, важна та часть энергии относительного движения тел, которая превращается во внутреннюю энергию. Полагая $v_{20} = 0$ (что, как правило, и выполняется), можно из формулы (2.38) получить скорость и энергию системы после удара:

$$v = \frac{m_1 v_{10}}{m_1 + m_2}; E = \frac{m_1^2 v_{10}^2}{2(m_1 + m_2)}. \quad (2.39)$$

Отсюда искомая энергия

$$\Delta E = E_0 - E = \frac{m_1 v_{10}^2}{2} - \frac{m_1^2 v_{10}^2}{2(m_1 + m_2)} = \frac{E_0}{1 + m_1/m_2}. \quad (2.40)$$

Как видим, ΔE тем больше, чем выше начальная энергия E_0 снаряда и меньше его масса m_1 по сравнению с массой m_2 цели. При $m_2 \gg m_1$ $\Delta E \approx E_0$, т.е. энергия снаряда *полностью* расходуется на деформацию цели. Именно это и происходит при попадании в нее пули или бронебойного снаряда (в лабораторном практикуме пуля застревает в мишени, висящей на длинном подвесе; пользуясь законами неупругого удара, по отклонению мишени после выстрела можно определить скорость пули).

Если же масса m_2 мала, то и деформация цели мала. В пределе при $m_2 \ll m_1$ $\Delta E = 0$. Это означает, что цель «подхватывается» снарядом и летит вместе с ним. При этом вероятность разрушения цели зависит уже от ее материала и конструкции. Модуль силы, действующей на цель: $F = \Delta p_2 / \Delta t$, где $\Delta p_2 = m_2 v$ — модуль приращения импульса цели. Если эта сила создает в цели напряжение, большее ее предела прочности, то цель разрушается даже при малой массе, как это происходит, например, с насекомым на лобовом стекле движущегося автомобиля.

Формула (2.40) выражает энергетический итог всевозможных событий космического и локального масштабов.

Примеры практики

При неупругом ударе астероида о Землю может выделиться энергия, во много раз больше энергии ядерной бомбы, сброшенной на Хиросиму, и вызвать последствия глобального масштаба (см. гл. 12). Существенно меньшая, но технологически важная энергия выделяется при ковке, штамповке, забивании фундаментной сваи или в дорожно-транспортном происшествии. В военных действиях такие «происшествия» осуществляют порой намеренно: во время Второй мировой войны советские летчики и японские камикадзе практиковали таран или направляли погибающий самолет на колонну противника. Прочность конструкций военной техники определяет их стойкость при поражающем действии оружия, безопасность при опрокидывании, столкновениях и т.д.

Поражающие цель неупругие удары издревле осуществляли с помощью орудий, метавших каменные, свинцовые и чугунные ядра. В наше время кинетическое оружие — это пули, подкалиберные бронебойные снаряды, снаряды электромагнитных пушек. *Разрывные* снаряды стали применять в XVI в. Эти начиненные порохом чугунные полые ядра (с трубкой для воспламенения) приобрели в наше время вид мин, касетных бомб, гранат, торпед и ядерного оружия.

Пробивное действие пули зависит от ее калибра, массы, формы и конструкции, а также от материала пробиваемой среды. При быстро протекающем ударе он проявляет порой неожиданные свойства, например жидкость ведет себя как твердое тело и при ударе разбивается, словно хрупкое стекло. В то же время стекло способно почти полностью «ободрать» пулю, особенно остроконечную, оставив в пролетевшей ее части лишь малую массу. С тупыми пистолетными пулями, летящими с невысокими скоростями, такого не происходит.

Для поражения самолета, имеющего легкие броневые покрытия, пуля должна иметь энергию ~ 1000 Дж, а для поражения человека — ≥ 80 Дж. Поражающее

действие снайперской пули увеличено тем, что ее стальной сердечник имеет в головной части чуть заметный скос. Поэтому при попадании в мягкие ткани тела она разворачивается боком и оставляет в них большие повреждения. Пробивное действие пули определяют с помощью сосновых досок толщиной 2,5 см, расположенных с промежутками 2,5 см. Например, пуля снайперской винтовки пробивает до 36 досок с расстояния 100 м. Снаряды поражают цели ударом, газами разрыва и осколками, а кумулятивные снаряды — струей от взрыва разрывного заряда.

2.7. Релятивистская динамика

Поправки, которые СТО внесла в кинематику, не могут не коснуться и связанной с нею динамики. Наличие предельной скорости (скорости света) ставит под сомнение главный закон механики — второй закон Ньютона. В соответствии с ним если сила действует на тело достаточно долго, то ничто не мешает ему достичь *любой* скорости. Для того чтобы этого не произошло, нужно, чтобы с ростом скорости уменьшалось ускорение, но при постоянной силе это возможно только в случае, если *масса тела будет расти*.

Оценку того, как именно это происходит, можно сделать на примере неупругого удара¹. Полученная А. Эйнштейном формула имеет вид

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (2.41)$$

Здесь m_0 — это масса частицы в *собственной* системе отсчета, которая называется **массой покоя**. Как видим, *масса тела растет с увеличением его скорости*, т.е. масса — понятие относительное, она зависит от системы отсчета. Отсюда — *релятивистский импульс и релятивистский закон динамики*:

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} = \frac{m_0\mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad \mathbf{F} = \frac{d(m\mathbf{v})}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{m_0\mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right). \quad (2.42)$$

Как следует из формул (2.42), в разных ИСО сила может иметь разные модуль и направление.

При $v^2/c^2 \ll 1$ выражение (2.41) можно разложить в ряд:

$$m = m_0(1 - v^2/c^2)^{-1/2} \approx m_0 \left(1 + \frac{1}{2} v^2/c^2 \right),$$

где представлены только два первых члена убывающего ряда. Отсюда

$$mc^2 = m_0c^2 + \frac{m_0v^2}{2},$$

т.е.

$$mc^2 = m_0c^2 + E_k. \quad (2.43)$$

¹ См., например, работу: Айзензон А. Е. Курс физики : учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Высшая школа, 2009.

Поскольку последний член — это кинетическая энергия, то и два других имеют ее размерность. Более того, если тело в данной ИСО находится в покое ($E_k = 0$), то, несмотря на это, оно имеет **энергию покоя**:

$$E_0 = m_0 c^2. \quad (2.44)$$

Это самый знаменитый вывод СТО, который опровергал накопленное веками убеждение, что энергия связана либо с движением (кинетическая энергия), либо с относительным положением тел (потенциальная энергия). Железнодорожный состав обладает, казалось бы, огромной кинетической энергией, однако ее отношение к энергии покоя $\sim (c/v)^2$, т.е. $\sim 10^{14}$! Как видим, $m_0 c^2$ — колоссальная величина: основная часть энергии определяется не скоростью тела, а его массой! Оказалось, что *масса — не только мера инертности и гравитационного взаимодействия, но и мера энергии*.

Поверить в результат, полученный А. Эйнштейном, было чрезвычайно трудно: никто никогда не замечал тех огромных энергий, какие требует формула (2.44). Правда, чаще всего мы имеем дело не с самой энергией, а с ее *изменением*. В каком-нибудь высокогорном селении можно играть в футбол, ковать железо, взрывать тротилловый заряд, и все это будет происходить ровно так же, как и на уровне моря, — разность потенциальных энергий никак не сказывается. По-видимому, что-то подобное отражает и формула (2.44), побуждая искать скрытую энергию $m_0 c^2$. Через много лет стало ясно, что она проявляется только на глубоком структурном уровне вещества и потому не сказывается на энергетических проявлениях более высоких уровней. Будучи реализованной в ядерном оружии, эта энергия приносит огромные разрушения (см. параграф 11.5).

Богатство содержания формулы (2.44) сказывается и в обратном: *в каком бы виде ни проявлялась энергия, ей соответствует некоторая масса*. Это означает, что, например, электромагнитное поле (имеющее энергию) также обладает массой, а значит, и импульсом (см. параграф 9.4). Более того, частицы и поле могут даже превращаться друг в друга! При этом материя вообще не исчезает, а лишь переходит из одной формы в другую, как и присутствующая ей энергия (см. параграф 12.5).

Резюме

Подводя итоги настоящей главы, отметим ее основные положения.

Работа консервативной силы преобразуется в механическую энергию тела, и наоборот. При этом в замкнутой системе полная механическая энергия (сумма кинетической и потенциальной) остается постоянной.

Импульс замкнутой системы тел также остается постоянным. Если в незамкнутой системе результирующая сила по какому-либо направлению равна нулю, то составляющая импульса системы по этому направлению также постоянна.

При упругом ударе выполняются оба закона сохранения, а при неупругом — только закон сохранения импульса.

Масса тела — понятие относительное (зависит от системы отсчета). Она является мерой не только инерции и гравитационного взаимодействия, но и энергии тела.

Законы сохранения энергии и импульса строго выполняются в макро- и микромире и лежат в основе множества технических решений, относящихся в том числе к ВВТ.

Вопросы для самоконтроля

1. В 1919 г. английский астрофизик А. Эддингтон наблюдал звезды вблизи диска Солнца во время солнечного затмения. Влияют ли такие условия наблюдения на видимое положение звезд?
2. Зачем ракеты делают двух- и трехступенчатыми?
3. Автомобиль массой 3 т имеет скорость 60 км/ч. Чему равна его кинетическая энергия в системе отсчета, связанной с кузовом?
4. Можно ли, поднимая на вертолете груз массой 10 кг на высоту 100 м, совершить работу больше 1 кДж? Меньше 1 кДж?
5. Одинаков ли расход топлива при увеличении скорости автомобиля вдвое в случаях, когда начальная скорость 20 км/ч и 50 км/ч? При увеличении скорости на 20 км/ч с этими же начальными скоростями?
6. Почему, въезжая в гору, водитель автомобиля переключает сцепление на более низкую передачу, а при спуске его отключает?
7. Для замедления нейтронов в ядерных реакторах используют их упругие удары с ядрами углерода, масса которых в 12 раз больше массы нейтрона. Какую часть энергии теряет нейтрон при каждом столкновении?
8. В деревянный массивный шар, висящий на длинном легком подвесе, производится выстрел из карабина в горизонтальном направлении. В каком случае отклонение подвеса от вертикали больше: если трос стальной или резиновый?
9. Автомобиль с постоянной скоростью проходит три участка трассы равной протяженности: выпуклый, горизонтальный и вогнутый. На каком из них расход топлива максимален? Минимален?
10. Тележка катается без трения по желобу, форма которого моделирует трассу с горбами и впадинами. Пользуясь тем, что работа консервативной силы равна убыли потенциальной энергии, определите направления сил, действующих на тележку в разных точках. Определите положения равновесия — устойчивого и неустойчивого.

Задачи с решениями

2.1. Водитель обязан соблюдать дистанцию между автомобилями, предотвращающую столкновение. Распространенная рекомендация: дистанция l между автомобилями в метрах должна быть равна половине скорости v в км/ч: если скорость равна, например, 60 км/ч, то дистанция — 30 м и т.д. Правильна ли эта рекомендация?

Решение. Дистанция определяется двумя компонентами. Меньший из них пропорционален скорости, поскольку определяется расстоянием, которое автомобиль пройдет за время запаздывания реакции водителя. Большой компонент — это тормозной путь l . Он определяется равенством кинетической энергии автомобиля и работы силы трения скольжения F_c . При заблокированных колесах на горизонтальной дороге $mv^2/2 = F_c l$, где $F_c = k_c mg$.

Как следует из этой формулы, зависимость $l(x)$ квадратичная. Если скорость увеличилась, например, вдвое, то при той же силе трения тормозной путь возрастает в четыре раза. Учитывая, что с ростом скорости коэффициент трения k_c уменьшается, дистанция возрастает еще больше.

Ответ. Рекомендация неверна.

2.2. Установившаяся скорость падения парашютиста в безветренную погоду равна 5 м/с. Его рост 180 см, масса 80 кг. Какова средняя сила его удара о землю при скорости бокового ветра 4 м/с?

Дано: $h = 180 \text{ см} = 1,8 \text{ м}$; $m = 80 \text{ кг}$; $v_1 = 5 \text{ м/с}$; $v_2 = 4 \text{ м/с}$.

$F_{\text{ср}} = ?$

Решение. Удар начинается с момента касания земли до момента падения центра инерции человека на землю, положение которого оценим соотношением $l_c = 0,5h$.

Модуль средней силы удара определяется вторым законом Ньютона:

$$F_{\text{ср}} = \frac{\Delta mv}{\Delta t},$$

где $\Delta mv = mv$ — модуль импульса парашютиста до момента касания земли, Δt — среднее время от момента касания до падения. Полагая, что за время Δt скорость убывает линейно, получим

$$\Delta t = \frac{2l_c}{v}.$$

Таким образом,

$$F_{\text{ср}} = \frac{mv^2}{2l_c} = \frac{mv^2}{h} = \frac{m(v_1^2 + v_2^2)}{h},$$

где учтено равенство $v^2 = v_1^2 + v_2^2$.

Подставляя данные, найдем $F_{\text{ср}} \approx 1,8 \cdot 10^3 \text{ Н}$.

Примечание. Конечную формулу можно также получить из равенства кинетической энергии парашютиста и работы силы $F_{\text{ср}}$.

2.3. При массе откатной части орудия 2400 кг пушка выстреливает снарядом массой 25 кг с начальной скоростью 800 м/с . Масса пороховых газов составляет $3,8 \text{ кг}$. Определим среднюю расчетную силу торможения в противооткатном устройстве, если длину отката ограничить расстоянием 1 м .

Дано: $M = 2400 \text{ кг}$; $m_c = 25 \text{ кг}$; $v_c = 800 \text{ м/с}$; $m_r = 3,8 \text{ кг}$; $l = 1 \text{ м}$.

$F = ?$

Решение. Работа противооткатного устройства должна гасить кинетическую энергию откатной части орудия:

$$Fl = \frac{Mv_{\text{отк}}^2}{2},$$

откуда $F = \frac{Mv_{\text{отк}}^2}{2l}$.

Скорость откатной части орудия определяется законом сохранения импульса

$$Mv_{\text{отк}} = m_c v_c + m_r v_r,$$

где v_r — скорость пороховых газов, которая в первом приближении линейно возрастает от нуля у затвора до скорости снаряда v_c у дульного среза. Поэтому уравнение приобретает вид

$$Mv_{\text{отк}} = (m_c + 0,5m_r)v_c.$$

Отсюда

$$v_{\text{отк}} = \frac{(m_c + 0,5m_r)v_c}{M}, \quad F = \frac{(m_c + 0,5m_r)^2 v_c^2}{2Ml}.$$

Подставляя данные, получим $F \approx 96 \text{ кН}$.

2.4. В ракете, выводящей разведывательный спутник на круговую орбиту, скорость истечения газа 2500 м/с . Во сколько раз ее стартовая масса должна быть больше конечной?

Дано: $u = 2500$ м/с.

$m_0/m - ?$

Решение. Искомое отношение масс определяется формулой Циолковского:

$$\frac{v}{u} = \ln \frac{m_0}{m},$$

где $v = 7900$ м/с, поскольку спутнику нужно сообщить первую космическую скорость.

Подставляя данные, получим $m_0/m \approx 24$.

2.5. Груз лежит на подпружиненной платформе, опустившейся под его действием на 0,5 см. На сколько она опустится при падении того же груза с высоты 10 см?

Дано: $l = 0,5$ см; $h = 10$ см.

$l_1 - ?$

Решение. В первом случае вес груза компенсируется упругой силой

$$mg = kl,$$

где m — масса груза; k — коэффициент жесткости пружины. При падении груза его потенциальная энергия тяготения преобразуется в энергию упругой деформации пружины:

$$mg(h + l_1) = \frac{kl_1^2}{2}.$$

Подставив первое выражение, получим уравнение

$$l_1^2 - 2ll_1 - 2lh = 0.$$

Решив квадратное уравнение, найдем

$$l_1 = -l \pm \sqrt{l^2 + 2lh}.$$

Поскольку второй член правой части по модулю больше первого, знак « $-$ » теряет физический смысл.

Подставив данные, получим $l_1 = 3,7$ см.

Примечание. Ход решения очередной раз показывает, что большинство задач следует решать до конца *в общем виде*, тогда необходимые, на первый взгляд, неизвестные (в данном случае m и k) сокращаются.

Задачи для самостоятельного решения

2.6. С какой средней силой давит на плечо автомат при стрельбе со скорострельностью 600 выстрелов в минуту, если масса пули 7,9 г, а ее скорость при вылете 715 м/с?

2.7. Какой толщины дерево может служить защитой от поражения человека пулей массой 7,9 г, летящей со скоростью 650 м/с, если для поражения требуется энергия 79 Дж? Средняя сила сопротивления движению пули в дереве 10 кН.

2.8. Вертолет массой 3,5 т висит в воздухе. С какой скоростью ротор отбрасывает вниз струю воздуха, диаметр которой считать равным диаметру ротора 18 м? Плотность воздуха принять равной 1,2 кг/м³.

2.9. Снаряд массой 40 кг, летевший горизонтально со скоростью 600 м/с, разрывается на две части. Осколок массой 30 кг летит в прежнем направлении со скоростью 900 м/с. Определите направление и модуль скорости второго осколка.

2.10. Автомобиль на горизонтальной трассе прошел по инерции (с выключенным сцеплением) 20 м до остановки. При этом на него действовала сила сопротивления, равная 10% его веса. Какой была начальная скорость автомобиля?

Глава 3

ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

*Нужному следствию причина
найдется.*

В результате изучения данной главы учащийся должен:

знать

- основные понятия, характеристики и законы кинематики и динамики движения частицы по окружности и вращательного движения твердого тела;
- сходства, различия, аналоги и связи характеристик и законов вращательного и поступательного движений;
- закон сохранения момента импульса и его проявления в природе, технике и вооружении;

уметь

- распознавать, вычлснять и анализировать проявления основ вращательного движения в объектах природы и техники;
- формулировать изучаемую военно-техническую задачу с позиций законов вращательного движения и применять аппарат теории для ее решения;

владеть

- навыками оперирования понятиями, методами и законами механики вращательного движения при решении военно-технических задач, сформулированных как физические;
 - навыками привлечения физических констант, справочных данных, оценки порядка величин и опоры на их размерности при решении задач механики вращательного движения.
-

3.1. Кинематика вращательного движения

Вышеприведенные законы механики относятся к **поступательному** движению тела, частицы которого описывают *одинаковые* траектории. Существует и такой вид движения тела, при котором одинаковые по форме траектории — окружности — имеют разную длину (радиусы). Такое движение называют **вращательным**. В отличие от поступательного, оно локализовано в пространстве, что в некоторых случаях полезно: в метровых габаритах можно получить энергию, для которой при поступательном движении потребовались бы километры. Движение по окружности позволило, в частности, создать современные ускорители заряженных частиц, на которых получены выдающиеся результаты (см. параграф 6.3). Вращение распространено и в природе: Земля вращается вокруг Солнца и своей оси, Луна — вокруг Земли и т.д. В технике вращаются колеса и маховики двигателей, валы и винты гребных судов и вертолетов, при стрельбе — снаряды и пули.

У свободного твердого тела *центром вращения* является его центр инерции, а у *несвободного* — закрепленная точка, находящаяся внутри или вне тела. Если закреплены две точки, то вращение происходит относительно проходящей через них **оси вращения**. В таком случае центры вращения всех частиц тела лежат на этой оси.

Если при поступательном движении перемещение частиц тела *одинаково*, то при вращательном движении оно *разное*. Это ясно из рис. 3.1, где показано сечение тела, перпендикулярное оси вращения O : перемещение dl_1 частицы 1 больше, чем dl_2 частицы 2. В то же время угол поворота $d\varphi$ их радиус-векторов, а значит, и **угловая скорость** ω одинаковы:

$$\omega = d\varphi/dt. \quad (3.1)$$

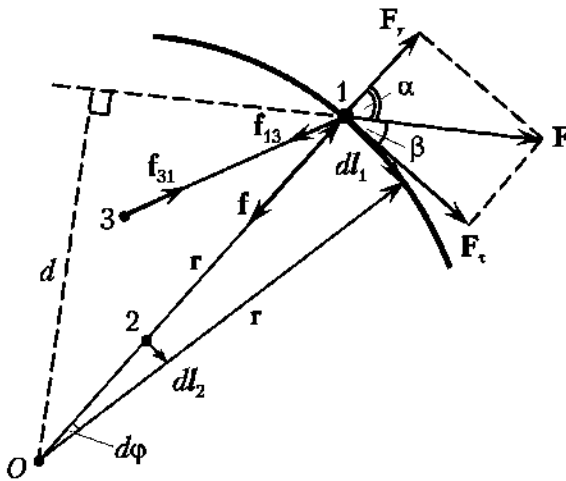


Рис. 3.1



Рис. 3.2

Вращение вокруг оси O может иметь два направления, а относительно центра вращения их может быть неограниченно много. Поэтому угловую скорость характеризуют не только модулем (3.1), но и направлением, которое определяют **правилом правого винта**: *если головку правого винта вращать в направлении вращения тела, то перемещение оси винта указывает направление вектора ω* (рис. 3.2).

Конечный угол φ поворота тела определяется интегрированием выражения (3.1) — аналогично операции (1.15):

$$\int_{\varphi_0}^{\varphi} d\varphi = \int_0^t \omega dt, \quad (3.2)$$

где φ_0 — начальный угол при $t = 0$. Например, при $\omega = \text{const}$ из формулы (3.2) получаем

$$\varphi = \varphi_0 + \omega t. \quad (3.3)$$

Время полного оборота тела (на 2π) называется **периодом** T , а число оборотов в единицу времени — **частотой** ν вращения. Связь между ними очевидна:

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}. \quad (3.4)$$

Из этих выражений ясно, почему угловую скорость ω называют также **круговой, или циклической, частотой**.

Переменную угловую скорость характеризуют угловым ускорением ε . Его определяют аналогично линейному ускорению (1.7):

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.5)$$

Поскольку для всех частиц твердого тела ω одинакова, то и ε одинаково. При $\omega = \text{const}$ $\varepsilon = 0$, что, однако, не означает, что ускорение вообще отсутствует: из самого факта вращения следует наличие *нормального* ускорения (1.10).

Как следует из формулы (3.5), при $d\omega > 0$ вектор ε сонаправлен с вектором ω (рис. 3.3, а), а при $d\omega < 0$ антипараллелен ему.

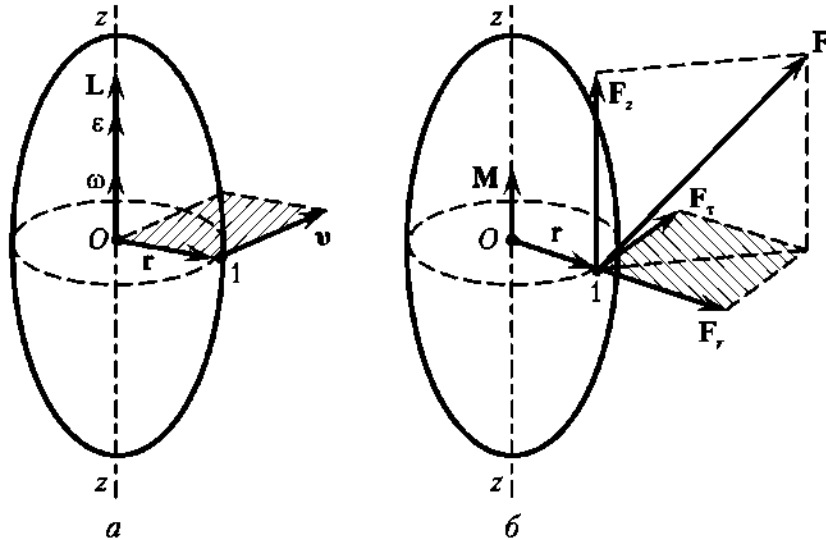


Рис. 3.3

Подставляя в формулу (3.1) равенство $dr = r d\varphi$ (см. рис. 3.1), получим известную связь линейной и угловой скорости:

$$v = \omega r. \quad (3.6)$$

Примеры практики

1. В соответствии с формулой (3.6) угловая скорость шпинделя станка определяет линейную скорость обработки в точках контакта резцов, сверл и фрез с поверхностью детали, а угловая скорость вращения колес определяет линейную скорость автомобиля.
2. Издревле формулой (3.6) интуитивно пользовались для метания снарядов пращей и катапульты. В 1908 г. русский инженер Б. Н. Безобразов развил этот принцип в виде так называемой центробежной пушки, снаряды которой срывались по касательной с вертикального колеса при его раскрутке. В 1920—1930-х гг. американцы и японцы пытались воплотить ту же идею в пулеметах, однако это потребовало мощных двигателей и больших радиусов метательного диска. Такое оружие громоздко и не обеспечивает точности и кучности стрельбы.

В формуле (3.6) фигурируют модули v , ω и r . Математическая операция, которая связывает соответствующие векторы, — это *векторное произведение*:

$$\mathbf{v} = [\boldsymbol{\omega}, \mathbf{r}], \quad v = \omega r \sin \varphi, \quad (3.7)$$

где второе выражение определяет модуль вектора \mathbf{v} , а φ — угол между векторами $\boldsymbol{\omega}$ и \mathbf{r} . Как следует из соотношений (3.7), формула (3.6) отражает лишь

частный случай $\varphi = \pi/2$. В соответствии с соотношениями (3.7) *направление* вектора \mathbf{v} определяется **правилом правого винта**: *головку винта вращают от первого вектора в скобках* (в данном случае — ω) *ко второму* (\mathbf{r}), *и перемещение его оси указывает направление вектора \mathbf{v}* . Так, на рис. 3.3, *a* радиус-вектор \mathbf{r} частицы 1 составляет с осью вращения z угол $\pi/2$ — частица вращается вокруг центра O , находящегося на оси z . Вектор \mathbf{v} ее линейной скорости направлен по касательной к траектории, изображенной пунктиром, а направление вектора ω определяется описанным выше правилом правого винта при известном направлении вращения.

Чтобы количественно связать угловое и линейное *ускорения*, подставим в первый член правой части формулы (1.8) выражение (3.6). Тогда для *модулей* ускорений $a_t = \varepsilon r$. Нетрудно убедиться, что связь между соответствующими *векторами* также определяется векторным произведением:

$$\mathbf{a}_t = [\varepsilon, \mathbf{r}]. \quad (3.8)$$

3.2. Динамика вращательного движения тела

Приложим к маховику вентиля силу, линия действия которой проходит через ось его вращения. Вентиль останется в состоянии покоя. Теперь направим силу под углом к этому направлению (в плоскости маховика), и вентиль повернется. Чтобы понять, в чем разница, рассмотрим частицу 1, жестко связанную с центром O вращения, на которую в плоскости чертежа действует сила \mathbf{F} (см. рис. 3.1). Ее составляющая \mathbf{F}_r , направленная по радиус-вектору \mathbf{r} частицы, вызовет только упругую реакцию \mathbf{f} ее связи с центром вращения, а перемещение $d\mathbf{l}_1$ частицы происходит под действием составляющей \mathbf{F}_t . Приложенная сила совершит работу

$$\delta A = \mathbf{F}d\mathbf{l} = F(\cos\beta)dl = F(\sin\alpha)dl = rF(\sin\alpha)d\varphi, \quad (3.9)$$

где учтено равенство $d\mathbf{l} = r d\varphi$. Сопоставим формулу (3.9) с формулой (2.3). Если $d\varphi$ — это *аналог перемещения*, то $rF\sin\alpha$ выступает как *аналог модуля силы* (точнее, ее проекции на перемещение). Его называют модулем **момента силы** относительно центра вращения (понятие момента силы ввел еще Архимед):

$$M = rF\sin\alpha = Fd, \quad (3.10)$$

где $d = r\sin\alpha$ (см. рис. 3.1) — кратчайшее расстояние от центра вращения до линии действия силы. Оно называется **плечом силы**. Формула (3.10) представляет собой модуль векторного произведения векторов \mathbf{r} и \mathbf{F}

$$\mathbf{M} = [\mathbf{r}, \mathbf{F}], \quad (3.11)$$

которое определяет направление вектора \mathbf{M} . Если на частицу действует *несколько* моментов сил, то проявляется их *аддитивность*:

$$\mathbf{M} = [\mathbf{r}, \mathbf{F}] = [\mathbf{r}, (\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots)] = \mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2 + \dots \quad (3.12)$$

Результирующий момент равен векторной сумме моментов отдельных сил.

Примеры практики

1. Момент силы, вращающий наждачный круг, и момент силы, возникающий от его торможения затачиваемым резцом, направлены в противоположные стороны.

2. Реакция в пятне контакта автомобильного колеса и валика, который оно выдавливает, создает момент, препятствующий вращению колеса (см. рис. 1.9).

На рис. 3.3, б показано тело, вращающееся относительно оси z . В отличие от рис. 3.1 сила \mathbf{F} не лежит здесь в плоскости вращения частицы 1 и потому формирует дополнительную составляющую \mathbf{F}_z , параллельную оси вращения. На угловое ускорение она не влияет, но создает момент силы, *изгибающий ось вращения*. Для автомобильного колеса, например, он возникает при заносе или перекосе полуоси.

Составляющая \mathbf{F}_z , как и на рис. 3.1, не влияет на вращение, так как ее плечо равно нулю, — она лишь формирует *нагрузку на ось вращения*. Для оси автомобильного колеса эта сила — составляющая веса автомобиля. Таким образом, угловое ускорение определяется только *составляющей \mathbf{F}_\perp , перпендикулярной оси вращения и создающей момент вращения \mathbf{M}* , который называют **моментом силы относительно оси вращения**. Его направление определяется формулой (3.11). На автомобильное колесо такой вращающий момент действует со стороны шпилек и болтов, которые крепят его к ступице.

Момент силы совершает работу по приданию частице кинетической энергии $E_k = mv^2/2$. Пользуясь формулой (3.6), преобразуем ее к виду $E_k = (mr^2)\omega^2/2$ и сравним с формулой E_k для поступательного движения. Поскольку ω — это аналог линейной скорости v , то в качестве аналога массы здесь выступает произведение mr^2 , которое получило название **момента инерции частицы относительно центра ее вращения**:

$$J = mr^2. \quad (3.13)$$

Как следует из формулы (3.13), момент инерции измеряется в $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Таким образом, кинетическая энергия частицы

$$E_k = \frac{J\omega^2}{2}. \quad (3.14)$$

Для ее получения совершена работа, выражение для которой следует из формул (3.9), (3.10) и (3.14):

$$\delta A = M d\varphi = dE_k = J\omega d\omega. \quad (3.15)$$

Интегрируя эти выражения, легко найти работу по раскручиванию частицы на *конечный* угол. Подставляя в формулу (3.15) выражение (3.1), получаем $M dt = J d\omega$, т.е. $M = J\varepsilon$. Из сопоставления формул (3.8) и (3.11) следует, что \mathbf{M} и ε — сонаправленные векторы. Поэтому в векторной форме

$$\mathbf{M} = J\varepsilon. \quad (3.16)$$

Это выражение по форме и смыслу аналогично выражению (1.34), однако при переходе от частицы к телу между формулами проявляются отличия. При поступательном движении *все* частицы тела движутся *одинаково*. Поэтому его масса входит в уравнение (1.34) в виде *суммы масс* его частиц. При вращательном движении следует складывать уже не массы, а моменты инерции J (3.13), а они *различны* ввиду *различий* радиус-векторов \mathbf{r} частиц тела относительно центров их вращения, расположенных на оси. Второе отличие в том, что при поступательном движении в уравнение (1.34) входит векторная сумма *сил*, а при вращательном — сумма их *моментов \mathbf{M}* , которые зависят не только от модулей и направлений, но и от точек приложения сил.

Чтобы получить закон динамики для вращающегося тела, воспользуемся тем, что оно *как целое* имеет кинетическую энергию, полученную в результате работы по его раскручиванию. Элементарная работа по перемещению произвольных частиц тела 1 и 3 (см. рис. 3.1) равна

$$\delta A = \mathbf{F}_1 d\mathbf{l}_1 + \mathbf{F}_3 d\mathbf{l}_3 + \mathbf{f}_{13} d\mathbf{l}_1 + \mathbf{f}_{31} d\mathbf{l}_3, \quad (3.17)$$

где $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_3$ — внешние силы, действующие на частицы; $\mathbf{f}_{13}, \mathbf{f}_{31}$ — силы связи между ними; $d\mathbf{l}_1, d\mathbf{l}_3$ — элементарные перемещения частиц. На основании формул (3.9), (3.10) выражение (3.17) преобразуется к виду

$$\delta A = (M_1 + M_3)d\phi + (M_{13} + M_{31})d\phi, \quad (3.18)$$

где учтено, что угол $d\phi$ для всех частиц одинаков. Силы связи \mathbf{f}_{13} и \mathbf{f}_{31} имеют одинаковые плечи относительно центра вращения, равны по модулю и направлены вдоль одной и той же прямой в противоположные стороны. Следовательно, второе слагаемое правой части равенства (3.18) для любых пар частиц равно нулю. Тогда для тела в целом

$$\delta A = d\phi \sum_i M_i = \omega dt \sum_i M_i, \quad (3.19)$$

где справа — сумма модулей моментов внешних сил. Их работа идет на приращение кинетической энергии тела, которая равна сумме кинетических энергий его частиц. На основании формул (3.13), (3.14) получаем

$$E_k = \frac{\omega^2}{2} \sum_i m_i r_i^2 = \frac{J\omega^2}{2}, \quad (3.20)$$

где

$$J = \sum_i m_i r_i^2. \quad (3.21)$$

Эта сумма называется **моментом инерции тела относительно оси вращения**. Из формулы (3.20) следует

$$dE_k = J\omega d\omega. \quad (3.22)$$

Из формул (3.19) и (3.22) получаем

$$\varepsilon = \frac{\mathbf{M}}{J}, \quad (3.23)$$

где $\mathbf{M} = \sum_i \mathbf{M}_i$ и ε обозначены как векторные величины, поскольку чаще всего они сонаправлены. Формула (3.23) — это **основной закон динамики вращательного движения**: *угловое ускорение тела пропорционально сумме моментов внешних сил относительно оси его вращения и обратно пропорционально моменту инерции тела относительно той же оси.*

Этот закон получен как следствие второго и третьего законов Ньютона для тел, момент инерции которых в процессе движения остается постоянным. По форме это аналог второго закона Ньютона. Его изучают в лабораторном практикуме.

Примеры практики

В геометрии стрелкового оружия учтено, что глаз, осуществляющий прицеливание вдоль ствола, и место упора приклада (плечо стрелка) находятся на разной высоте (рис. 3.4). На затвор (и приклад) действует сила отдачи F , проекция которой $F_1 = F \cos \varphi$ определяет толчок в плечо (отдача), а проекция $F_2 = F \sin \varphi$ создает момент силы относительно точки A упора приклада. Это приводит к вздергиванию ствола вверх, сказывается на точности стрельбы и учитывается при прицелке оружия.

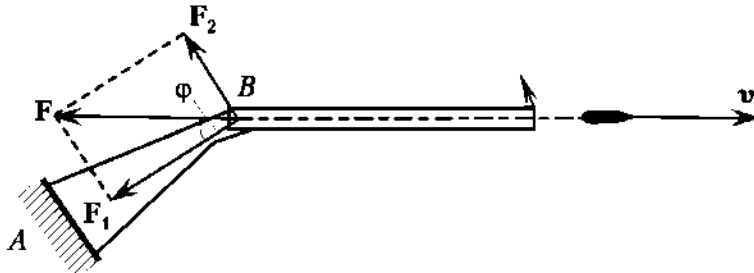


Рис. 3.4

2. Лишнюю в данное время энергию можно направить на работу по раскручиванию маховика, а когда она потребуется, ее можно вернуть в систему. Такая технология называется *рекуперацией*. Ее применяют на транспорте, в энергетике и т.д.

Как следует из формулы (3.23), мерой инертности тела при вращательном движении служит момент инерции J . Его расчет относительно прост для однородных тел правильной геометрической формы.

1. Тонкостенная трубка (или кольцо) массой m отличается тем, что все ее частицы имеют равные радиус-векторы относительно оси симметрии (рис. 3.5, а). Поэтому

$$J = R^2 \sum_i m_i = mR^2. \quad (3.24)$$

2. Если вращается однородный диск с плотностью материала ρ , то его можно представить как совокупность i таких колец с шириной обода Δr (рис. 3.5, б). В соответствии с формулой (3.24) $J_i = m_i r_i^2$, где $m_i = 2\pi r_i h \rho \Delta r$. Переходя к пределу $\Delta r \rightarrow dr$ и складывая (интегрируя) моменты инерции всех колец, получаем

$$J = 2\pi \rho h \int_0^R r^3 dr = \frac{\pi \rho h R^4}{2} = \frac{mR^2}{2}, \quad (3.25)$$

где m — масса диска.

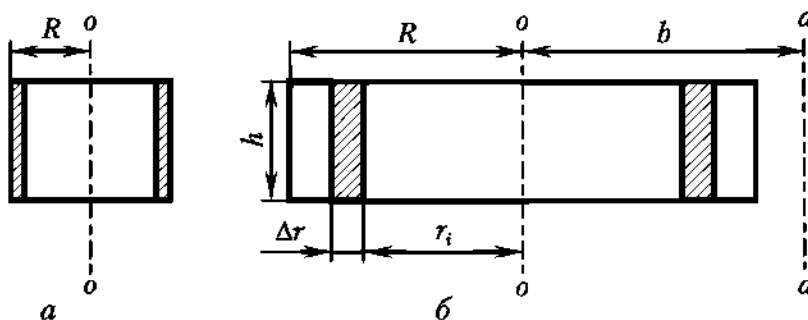


Рис. 3.5

3. Подобный расчет нетрудно сделать и для однородных симметричных тел иной формы, если ось вращения проходит через их центр инерции. Например, прямолинейный тонкий стержень массой m и длиной l имеет момент инерции относительно перпендикулярной ему оси $ml^2/12$; у сплошного шара момент инерции относительно оси, проходящей через его центр, $2mR^2/5$ и т.д.

Ось вращения далеко не всегда проходит через центр инерции тела. В таких случаях пользуются **теоремой Штейнера**: *если момент инерции тела относительно оси, проходящей через его центр инерции, равен J_0 , то его момент инерции J_a относительно любой другой оси, параллельной этой, определяется выражением*

$$J_a = J_0 + mb^2, \quad (3.26)$$

где b — расстояние между осями (см. рис. 3.5, б).

Если тело *неоднородно* или имеет *несимметричную форму*, то интегрирование типа (3.25) становится громоздким. В таких случаях момент инерции определяют экспериментально, измеряя характеристики таких движений, которые от него зависят, например колебаний. Подобные методы применяют для коленчатых валов, блоков шестерен, винтов судов и самолетов и т.д. (в лабораторном практикуме изучают колебания детали, лежащей на платформе трифилярного подвеса).

Из формулы (3.21) следует, что при равных массах частиц их вклад в момент инерции тела тем больше, чем больше их радиус-вектор.

Примеры практики

1. Маховик, насаженный на коленчатый вал автомобиля, представляет собой относительно тонкий диск с массивным «венцом» *на периферии*. Благодаря такому перераспределению массы он имеет повышенный момент инерции и потому во время пауз в работе цилиндров поддерживает движение вала *по инерции*, что позволяет выводить поршни из мертвых точек, сжимать рабочую смесь и т.д. Это типичный пример упомянутой выше релаксации. Такой маховик — для повышения плавности хода велосипеда — использовал еще русский изобретатель И. П. Кулибин (1735—1818).

2. На некоторых гоночных автомобилях двигатель располагают не в передней или задней части корпуса, а посередине. В таком случае момент инерции машины относительно ее *центра инерции* уменьшается, что обеспечивает большую маневренность при поворотах, требующих меньших моментов сил.

Вследствие неоднородности материала, неточности изготовления детали и ее центровки возникают центробежные силы по разные стороны оси, которые не вполне компенсируют друг друга. Такой дисбаланс вызывает периодические поперечные нагрузки на ось, ослабляет крепеж, создает деформации и даже может привести к разрушениям конструкций. Балансировка особенно важна для массивных тел, вращающихся с большой угловой скоростью.

3.3. Момент импульса

Важной мерой *поступательного* движения является импульс \mathbf{p} частицы. При *вращательном* движении его аналогом является **момент импульса \mathbf{L}** , связь которого с импульсом подобна связи линейной и угловой скоростей:

$$\mathbf{L} = [\mathbf{r}, \mathbf{p}] = m[\mathbf{r}, \mathbf{v}], \quad (3.27)$$

где \mathbf{r} — радиус-вектор частицы относительно центра вращения. Модуль этого векторного произведения — $L = mrv \sin \varphi$, где φ — угол между векторами \mathbf{r} и \mathbf{v} . Например, для случая, показанного на рис. 3.3, *a*, момент импульса частицы 1 направлен по оси z вверх, а его модуль равен $L = mrv = mr^2\omega = J\omega$, так как $\varphi = \pi/2$. Поскольку направления векторов \mathbf{L} и ω совпадают, это равенство можно записать в векторной форме:

$$\mathbf{L} = mr^2\omega = J\omega.$$

Каждая частица тела имеет свой момент импульса, а их сумма называется **моментом импульса тела относительно оси вращения**:

$$\mathbf{L} = \omega \sum_i m_i r_i^2 = J\omega. \quad (3.28)$$

Момент импульса тела относительно оси вращения равен произведению его момента инерции относительно той же оси на угловую скорость.

Второй закон Ньютона бывает удобнее выразить в виде (1.35). То же относится к основному закону динамики вращательного движения, что справедливо и в случае, когда момент инерции в процессе движения изменяется:

$$\sum_i \mathbf{M}_i = \frac{d(J\omega)}{dt} = \frac{d\mathbf{L}}{dt}. \quad (3.29)$$

Эта формула служит основой многих технических решений, например нарезного оружия, в стволах которого пулям и снарядам *придают вращательное движение*. В оружии Российской армии принято правое направление нарезов ствола, соответствующее правой резьбе в винтовых соединениях. Левые нарезы применяют в английском и японском оружии.

Примеры практики

1. Как отмечено выше, пуля (снаряд) в момент выстрела получает толчок снизу. Кроме того, ее центр C инерции смещен книзу относительно центра сил сопротивления воздуха. В результате между осью пули и касательной к ее траектории возникает некоторый угол δ . Поэтому сила $\mathbf{F}_{\text{сопр}}$ сопротивления воздуха действует не вдоль оси пули (снаряда), а под некоторым углом к ней, последствия чего ясны из рис. 3.6. Они различны в зависимости от типа ствола, из которого вылетает пуля. После вылета из *гладкоствольного* оружия сила $\mathbf{F}_{\text{сопр}}$ создает относительно центра C инерции пули момент \mathbf{M} . В проекции, показанной на рис. 3.6, *a*,

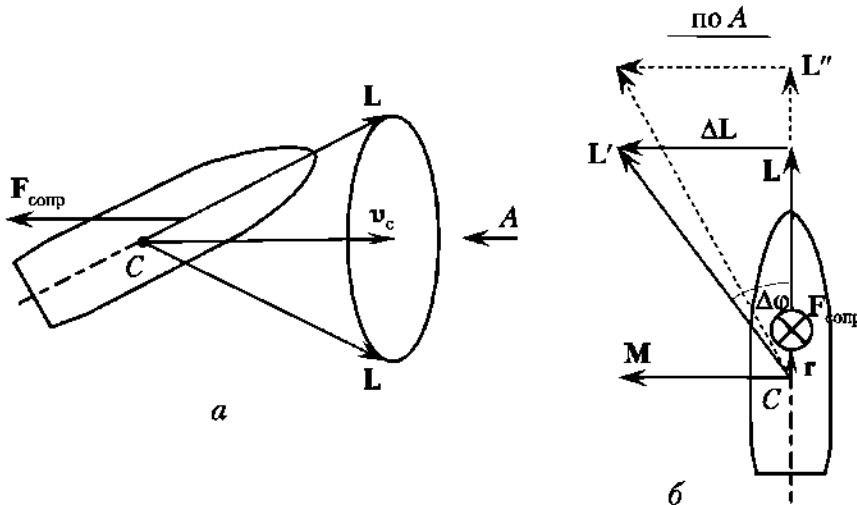


Рис. 3.6

он поворачивает пулю против часовой стрелки, и она кувыркается, что сказывается на дальности ее полета и точности попадания в цель.

Пусть теперь снаряд (пуля) вылетает из ствола *нарезного* оружия, вращаясь вокруг своей оси с моментом импульса L (см. рис. 3.6). Сила $F_{\text{сопр}}$ создает здесь точно такой же момент M , однако он производит теперь совершенно иное действие. Из формулы (3.29) следует, что он формирует приращение ΔL момента импульса, сонаправленное с вектором M . В сумме с вектором L оно образует новый момент импульса L' (рис. 3.6, б), и ось вращения пули, совпадающая с вектором L' , повернется не от нас, а влево! Это выглядит парадоксально: тело перемещается не в направлении действия силы $F_{\text{сопр}}$, а в перпендикулярном к нему направлении! Следующее приращение ΔL перпендикулярно уже вектору L' и т.д.

Так как действие силы $F_{\text{сопр}}$ непрерывно, а направление ее относительно пули меняется с каждым отклонением ее оси, то нетрудно оценить, что вершина пули описывает окружность, а ее ось — конус (см. рис. 3.6, а). Вершина конуса совпадает с центром C инерции пули, а его ось — с вектором скорости v_c . Точно так же ведет себя ось любого раскрученного тела, например волчка, описывающая коническую поверхность. Такое движение называется **прецессией**.

2. Явлением прецессии бессознательно пользуются велосипедисты и мотоциклисты, не поворачивая руль, а наклоняясь в сторону поворота. Вращающий момент силы тяжести формирует при этом вектор ΔL , и ось вращения переднего колеса поворачивается в ту же сторону.

Как следует из рис. 3.6, б, $dL = Ld\phi$. В то же время из формулы (3.29) следует $dL = Mdt$. Из двух этих равенств получаем $Ld\phi = Mdt$, т.е. угловая скорость прецессии равна

$$\Omega_{\text{пр}} = d\phi/dt = M/L. \quad (3.30)$$

Прецессия замечательна тем, что уменьшает отклонение оси снаряда от заданной траектории. Это придает ему в среднем лучшую обтекаемость, уменьшает силу сопротивления воздуха и приводит к увеличению дальности полета и точности стрельбы. Кроме того, в этом случае снаряд попадает в цель не случайной, а головной частью. Для пули это повышает ее проникающую способность, для снаряда — надежность срабатывания находящегося в головной части взрывателя.

ВОПРОС. Зависит ли рассмотренный эффект от скорости вращения снаряда?

ОТВЕТ. Если угловая скорость ω возрастает, то увеличивается и момент импульса L (см. рис. 3.6, б). Следовательно, тот же момент силы M , приводящий к такому же приращению ΔL , вызывает относительно *меньшее* отклонение оси вращения снаряда (пунктир на рис. 3.6, б).

Так как скорость поступательного движения пуль и снарядов в канале ствола весьма велика (от 200 до 3000 м/с), то они приобретают и огромную скорость вращения, например пуля автомата Калашникова вращается с частотой ~3000 об/с.

ВОПРОС. Любое упорядочение сопровождается издержками (законы термодинамики). Каковы они в случае придания снаряду вращательного движения?

ОТВЕТ. В результате врезания снаряда в канавки ствола резко возрастает трение, что влечет потери энергии и понижение КПД оружия, в частности уменьшаются начальная скорость и дальность полета снаряда.

Примеры практики

Снаряды первых «Катюш» стреляли на расстояние ~8,5 км. Из-за большого рассеивания снарядов в модернизированном варианте 1943 г. им придали вращательное движение. Это сделали, правда, не за счет нарезов, а с помощью тангенциально расположенных отверстий, через которые выходила часть пороховых газов. Плотность огня резко возросла, но дальность полета уменьшилась до 7,9 км. В немецких реактивных минометах, появившихся в 1944 г., также придавали снаряду вращение вокруг оси симметрии.

Второй вид издержек состоит в следующем. На протяжении всего полета на снаряд действует сила тяжести, порождая составляющую силы сопротивления воздуха $F_{\text{верт}}$, направленную вверх. Как следует из рис. 3.7 (вид на снаряд сверху), она формирует момент силы M и момент импульса ΔL , направленные в сторону вращения снаряда. В результате возникает отклонение снаряда от траектории в сторону его вращения. Его называют *дезивацией* и учитывают в таблицах артиллерийской стрельбы.

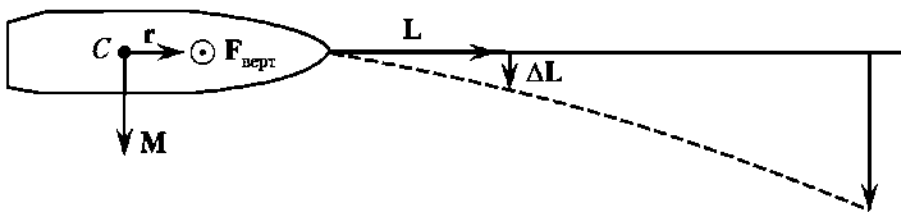


Рис. 3.7

Прецессию широко применяют в *гироскопе*, изобретенном немецким математиком и астрономом И. Боненбергером (1765—1831). Ротор гироскопа вращается с большой угловой скоростью, а ось его вращения благодаря карданному подвесу может свободно перемещаться относительно его корпуса, связанного с корпусом движущегося средства, например ракеты. Это приводит к тому, что при изменении положения корпуса ракеты изменяется и положение корпуса гироскопа относительно оси вращения его ротора. Возникшее расхождение преобразуют в корректирующий сигнал, подаваемый на руль. Этот принцип лежит в основе работы систем навигации ракет, космических аппаратов, в частности телескопов, автопилотов на кораблях, самолетах, подводных лодках и т.д.

Примеры практики

1. О возможностях автопилота свидетельствует случай, происшедший в 1989 г. Ошибочно приняв хлопок в двигателе истребителя за взрыв, советский летчик во время полета над территорией Польши катапультировался. Самолет после снижения вновь набрал высоту и лег на курс, заданный автопилоту. Таким образом он пролетел ~900 км над территорией ГДР, ФРГ, Нидерландов, Бельгии и упал только возле франко-бельгийской границы (во Франции в это время проходил визит М. Горбачева).
2. На пересеченной местности стволом орудия танка трудно управлять вручную, а применение гироскопа обеспечивает такую систему наведения, которая позволяет постоянно держать объект под прицелом. С теми же целями гироскопы применяют в успокоителях качки судов, направляющих аппаратов торпед, компасов, стабилизаторов и т.д.
3. Роторы гироскопов раскручивают газовыми турбинами или электродвигателями. Приведение в боевое положение переносного зенитно-ракетного комплекса

(ПЗРК) начинают с того, что включают источник питания, который раскручивает ротор гироскопа. На его оси установлен объектив тепловой (инфракрасной) головки самонаведения (ТГС), которая захватывает цель. В зависимости от угла между оптической осью объектива и направлением на цель (угла рассогласования) формируется управляющий сигнал, который подается на исполнительные механизмы системы управления ракеты.

4. Существуют и миниатюрные модели, встроенные в интегральную микросхему (МЭМС-технология). Они содержатся, например, в некоторых смартфонах, позволяя движением руки менять в компьютерных играх угол положения фигур, изображающих автомобили, оружие и т.п. Природными вибрационными гироскопами снабжены и мухи для ориентации при полете.

3.4. Закон сохранения момента импульса

Из формулы (3.29) следует: если левая часть равенства равна нулю, то

$$\mathbf{L} = J\boldsymbol{\omega} = \text{const.} \quad (3.31)$$

В замкнутой системе из двух тел

$$J_1\boldsymbol{\omega}_1 = J_2\boldsymbol{\omega}_2. \quad (3.32)$$

Это еще один (и весьма важный) закон сохранения, который называется **законом сохранения момента импульса**: *если сумма моментов внешних сил относительно оси вращения равна нулю, то момент импульса системы относительно этой оси остается постоянным.*

То же справедливо и для *незамкнутой* системы, если сумма проекций моментов сил на рассматриваемую ось вращения равна нулю.

Из формулы (3.32) следует: если момент инерции системы относительно оси вращения увеличился, то во столько же раз уменьшается угловая скорость ее вращения, и наоборот.

Примеры практики

1. На фигуриста, вращающегося вокруг своей оси, действуют только сила тяжести и упругая реакция опоры. Обе силы направлены по оси вращения, поэтому их моменты относительно нее равны нулю. Когда фигурист опускает руки, изменяя распределение своей массы относительно оси вращения, его момент инерции J уменьшается, т.е. $J_2 < J_1$. При этом, как следует из формулы (3.32), $\boldsymbol{\omega}_2 > \boldsymbol{\omega}_1$, т.е. угловая скорость вращения возрастает.

Заменив плечи человека шарнирами, а его тело — вращающимся объектом, получим систему стабилизации угловой скорости. Если в результате случайного воздействия она возросла, то под действием центробежной силы механические руки поднимутся, момент инерции возрастет и угловая скорость уменьшится, возвращаясь к заданному значению. Подобные системы используют в авиации и ракетной технике.

2. Зачем в хвостовой части вертолета ставят винт? Пусть $J_{\text{к}}$, $\boldsymbol{\omega}_{\text{к}}$ — момент инерции и угловая скорость корпуса вертолета относительно оси несущего винта, а $J_{\text{в}}$, $\boldsymbol{\omega}_{\text{в}}$ — те же характеристики самого винта. Тогда в состоянии покоя системы

$$J_{\text{к}}\boldsymbol{\omega}_{\text{к}0} + J_{\text{в}}\boldsymbol{\omega}_{\text{в}0} = 0.$$

Если винт привести во вращение с угловой скоростью $\boldsymbol{\omega}_{\text{в}}$, то должно выполняться

$$J_{\text{к}}\boldsymbol{\omega}_{\text{к}} + J_{\text{в}}\boldsymbol{\omega}_{\text{в}} = J_{\text{к}}\boldsymbol{\omega}_{\text{к}0} + J_{\text{в}}\boldsymbol{\omega}_{\text{в}0} = 0,$$

из чего следует

$$J_k \omega_k = -J_b \omega_b.$$

Как видим, корпус вертолета должен приобрести вращательное движение в сторону, противоположную направлению вращения винта. Так как $J_k \gg J_b$, то $\omega_k \ll \omega_b$, однако даже медленное вращение корпуса было бы крайне неудобно и для пилота, и для стрелка. Именно поэтому на хвосте вертолета располагают боковой винт: он создает тягу, направление которой предотвращает вращение корпуса, стабилизируя положение кабины в пространстве.

3. Ориентацию космической станции или космического телескопа «Хаббл» производят с помощью нескольких гироскопов, питаемых от солнечных батарей. Космический аппарат вращается в сторону, противоположную направлению вращения гироскопа.

Масса современных авиационных, корабельных и других гироскопов невелика — от единиц до десятков граммов. Она определяется собственно гироскопом, двигателем, раскручивающим его ротор, и батареей его питания. Однако высокие угловые скорости вращения придают им момент импульса, достаточный для решения задач управления.

Закон сохранения момента импульса, как и закон сохранения импульса, выполняется всегда — как в макро-, так и в микромире (при образовании звезд и планет, распаде ядер атомов и т.д.). Вообще, как установила немецкий математик А. М. Нётер (1882—1935), законы сохранения отражают разного рода симметрии: закон сохранения энергии — однородность времени, законы сохранения импульса и момента импульса — однородность и изотропность пространства.

В заключение приведем полезное (в том числе для запоминания) соотношение формул поступательного и вращательного движений (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Сравнение поступательного и вращательного движений

Поступательное	Вращательное
Перемещение r	Угол поворота φ
Скорость $v = \frac{dr}{dt}$	Угловая скорость $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$
Ускорение $a = \frac{dv}{dt}$	Угловое ускорение $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$
Масса m	Момент инерции $J = \sum_i m_i r_i^2$
Импульс $p = mv$	Момент импульса $L = m[r, v] = [r, p] = J\omega$
Сила F	Момент силы $M = [r, F]$
Основной закон динамики $F = ma$	Основной закон динамики $M = J\varepsilon$
Работа $\delta A = F_a dr$	Работа $\delta A = M_\varphi d\varphi$
Кинетическая энергия $E_k = \frac{mv^2}{2}$	Кинетическая энергия $E_k = \frac{J\omega^2}{2}$

Резюме

Подводя итоги настоящей главы, отметим ее основные положения.

Между законами вращательного и поступательного движений существуют аналогии: аналогами перемещения, скорости и ускорения являются, соответственно, угол поворота, угловая скорость и угловое ускорение, аналогом массы — момент инерции, аналогом силы — момент силы, аналогом импульса — момент импульса и т.д.

Модули и направления векторных характеристик вращательного движения определяются, как правило, векторным произведением, требующим применения правила правого винта. Это относится и к формулам, связывающим характеристики вращательного и поступательного движений.

Закон сохранения момента импульса — один из фундаментальных законов природы, который строго выполняется в макро- и микромире и лежит в основе множества технических решений, относящихся в том числе к ВВТ.

Вопросы для самоконтроля

1. Чем объяснить то, что Луна всегда обращена к Земле одной и той же стороной?
2. Почему Земля совершает полный оборот вокруг Солнца за одно и то же время?
3. Центробежная сила (инерции) обратно пропорциональна радиусу вращения. Почему же вблизи полюса тела не отрываются от Земли?
4. Зачем у некоторых вертолетов два несущих винта на общей оси, и как они вращаются?
5. Какие колеса — передние или задние — должны блокироваться первыми при резком торможении автомобиля? Почему торможение на низкой передаче эффективнее, чем при нейтральном положении сцепления?
6. Относительно какой оси нужно раскручивать тело до заданной угловой скорости, чтобы совершить наименьшую работу?
7. Почему автомобиль при резком старте «приседает» на задние колеса, а при резком торможении «клюет»?
8. Почему яйцо, сваренное вкрутую, способно вращаться долго, а сырое останавливается быстро?
9. Крутящий момент от двигателя к колесам автомобиля передается путем прижатия фрикционных накладок ведомого диска к ведущему диску сцепления. Как изменяется подводимая к колесам мощность по мере истирания накладок?
10. Почему выходное отверстие от пули больше входного?

Задачи с решениями

3.1. Докажем справедливость теоремы Штейнера (3.26) для штанги (тонкого стержня), конец которой закреплен на перпендикулярной к ней оси вращения.

Дано: $J_0 = ml^2/12$; $b = l/2$;

$J = J_0 + mb^2 = ?$

Решение. По теореме Штейнера для данного случая

$$J = J_0 + mb^2 = ml^2/12 + ml^2/4 = ml^2/3.$$

С другой стороны, расчет момента инерции:

$$J = \int_0^l \rho \pi r^2 l^2 dl = ml^2/3.$$

Ответ. Теорема Штейнера выполняется.

3.2. Какая бочка — пустая или наполненная соляной — скатится быстрее с грузовой платформы по наклонным лагам? Трением пренебречь.

Решение. При движении бочек без проскальзывания их путь одинаков и определяется числом сделанных ими оборотов. Следовательно, время скатывания зависит от их угловых ускорений

$$\varepsilon = \frac{M}{J}.$$

Сила, скатывающая бочку, приложена к ее центру инерции и является составляющей силы тяжести (рис. 3.8): $F = mg \sin \varphi$. Поскольку мгновенной осью вращения является образующая бочки, соприкасающаяся с наклонной поверхностью, то момент скатывающей силы

$$M = FR = mgR \sin \varphi.$$

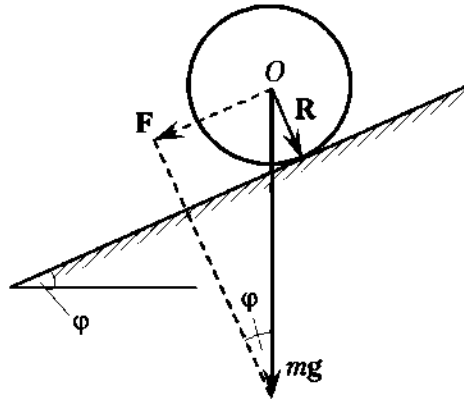


Рис. 3.8

Если пренебречь моментом инерции торцов, то момент инерции пустой цилиндрической бочки относительно оси, проходящей через ее центр инерции (совпадающей с осью симметрии): $J_c = m_1 R^2$. Мгновенная ось вращения параллельна этой оси и смещена относительно нее на R . Следовательно, по теореме Штейнера

$$J_1 = m_1 R^2 + m_1 R^2 = 2m_1 R^2.$$

Для полной бочки

$$J_2 = \frac{m_2 R^2}{2} + m_2 R^2 = \left(\frac{3}{2}\right) m_2 R^2.$$

Таким образом,

$$\varepsilon_1 = \frac{m_1 g R \sin \varphi}{2m_1 R^2} = \frac{g \sin \varphi}{2R}, \quad \varepsilon_2 = \frac{2m_2 g R \sin \varphi}{3m_2 R^2} = \frac{2g \sin \varphi}{3R}.$$

Ответ. $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$, т.е. полная бочка скатится быстрее.

3.3. При вылете из ствола модернизированного автомата Калашникова пуля имеет частоту вращения 3000 с^{-1} . Длина нарезной части ствола — 369 мм, шаг нарезов — 240 мм. Каково время движения пули в стволе и скорость ее вылета? Движение считать равноускоренным.

Дано: $\nu = 3000 \text{ с}^{-1}$; $l = 369 \text{ мм} = 0,369 \text{ м}$; $h = 240 \text{ мм} = 0,24 \text{ м}$.

$v = ?$ $t = ?$

Решение. Линейная скорость пули при вылете из ствола

$$v = \frac{h}{T} = \nu h.$$

При равноускоренном движении без начальной скорости

$$v = at, l = \frac{at^2}{2}, t = \frac{2l}{v} = \frac{2l}{vh}$$

Подставляя данные, получим $v = 720 \text{ м/с}$, $t = 1,03 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

3.4. Ось ротора гироскопа под действием момента внешних сил $0,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$ вращается в горизонтальной плоскости (прецессия), делая полный оборот за 100 с . Определим частоту вращения ротора гироскопа, если его момент инерции $3 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Дано: $M = 0,2 \text{ Нм}$; $T_{\text{прец}} = 100 \text{ с}$; $J = 3 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

$\nu - ?$

Решение. Угловая скорость прецессии

$$\omega_{\text{прец}} = \frac{2\pi}{T_{\text{прец}}} = \frac{M}{L},$$

где L — момент импульса ротора, вращающегося с угловой скоростью ω :

$$L = J\omega = 2\pi J\nu.$$

Таким образом,

$$\frac{2\pi}{T_{\text{прец}}} = \frac{M}{2\pi J\nu}, \nu = \frac{MT_{\text{прец}}}{4\pi^2 J}.$$

Подставляя данные, получим $\nu \approx 1,7 \cdot 10^4 \text{ мин}^{-1}$.

3.5. Стартер СТ103 имеет среднюю частоту вращения 2000 мин^{-1} при среднем крутящем моменте 25 Нм . Какую работу он совершает при запуске двигателя, который длится 5 с ?

Дано: $\nu = 2000 \text{ мин}^{-1} = 33,33 \text{ с}^{-1}$; $M = 25 \text{ Нм}$; $t = 5 \text{ с}$.

$A - ?$

Решение. Мощность, развиваемая стартером: $P = M\omega$ (по аналогии при поступательном движении $P = Fv$). Поскольку $\omega = 2\pi\nu$, то $P = 2\pi M\nu$, а совершаемая работа

$$A = Pt = 2\pi M\nu t.$$

Подставляя данные, получим $A \approx 26 \text{ кДж}$.

Задачи для самостоятельного решения

3.6. Какова линейная скорость поверхности Земли на широте 60° , обусловленная ее вращением относительно собственной оси?

3.7. При разгоне автомобиля его колеса вращались по закону $\varphi = \pi t^3/50 \text{ рад}$. Каковы угловая скорость и угловое ускорение колеса в момент, когда после начала движения оно совершило 80 оборотов?

3.8. Пуля массой $9,6 \text{ г}$ калибра $7,62 \text{ мм}$ вылетает из ствола пулемета Калашникова, вращаясь вокруг своей оси с частотой 3400 с^{-1} . Каковы ее момент инерции и момент импульса относительно оси вращения? Пулю считать однородным цилиндром.

3.9. Маховик двигателя автомобиля ЗИЛ-131 при частоте вращения коленчатого вала 900 мин^{-1} имеет момент импульса $42 \text{ кгм}^2/\text{с}$. Какую работу пужно совершить, чтобы раскрутить его дополнительно до 2400 мин^{-1} ?

3.10. Коленчатый вал двигателя автомобиля вращается на холостом ходу с частотой 850 оборотов в минуту. Какую мощность развивает двигатель, если момент сил трения составляет 50 Нм ?

Глава 4

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

*Пессимизм — корень прошлого.
Оптимизм — ветвь в будущее.*

В результате изучения данной главы учащийся должен:

знать

- предмет, цели, основные понятия, характеристики, модели, положения и законы молекулярно-кинетической теории и термодинамики, их эмпирические и теоретические основания;
- особенности и следствия классической статистики, законов переноса, цикла Карно и законов термодинамики;
- возможности и особенности применения законов молекулярно-кинетической теории и термодинамики для исследования объектов техники и вооружения;

уметь

- распознавать, вычленять и анализировать проявления молекулярно-кинетических и термодинамических закономерностей в изучаемых объектах природы и техники;
- формулировать изучаемую военно-техническую задачу с позиций законов молекулярно-кинетической теории и (или) термодинамики и применять аппарат теории для ее решения;

владеть

- навыками оперирования понятиями, методами и законами молекулярно-кинетической теории и термодинамики при решении военно-технических задач, сформулированных как физические;
 - навыками привлечения физических констант, справочных данных, оценки порядка величин и опоры на их размерности при решении задач молекулярно-кинетической теории и термодинамики.
-

4.1. Принципы классической статистики

О том, что вещество состоит из атомов, догадывались еще древние греки, но научное обоснование этого предположения появилось лишь в XVII—XVIII вв. в связи с изучением химических реакций.

Пусть в какой-то момент времени известны координаты и импульсы всех молекул газа, т.е. **микросостояние** системы. Тогда законы динамики позволяют, казалось бы, рассчитать его для следующего момента времени, затем следующего и т.д. Это и лежало в основе мысли французского математика П. Лапласа (1749—1827) о предопределенности судьбы Вселенной: ее нынешнее состояние — результат предыдущего и основа будущего состояний. Такой расчет позволил бы, в частности, оценивать *параметры состояния* газа — его объем V , давление p и температуру T . Они важны для кон-

троля атмосферы Земли, расчета подъемной силы крыла самолета, сопротивления движению транспортных средств, ракет, снарядов и т.д.

Задача, однако, осложняется огромным числом молекул. В одном моле вещества его определяет постоянная Авогадро, названная в честь итальянского физика и химика А. Авогадро (1776—1856): $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹. Чтобы вообразить это огромное число, прибегают иногда к образам. Представим, что все молекулы из чаши яда, которую заставили выпить Сократа, равномерно распределились по поверхности Земли. Тогда в каждой чашке чая содержалось бы несколько молекул из той чаши.

При таком количестве частиц динамические расчеты немыслимы. Даже для *трех* взаимодействующих тел найти законы их движения весьма не просто, и потому физика начала с экспериментов. Благодаря им удалось связать параметры состояния системы эмпирическим уравнением, полученным французским физиком Б. Клапейроном (1799—1864) и русским химиком Д. И. Менделеевым (1834—1907):

$$pV = \nu RT, \quad (4.1)$$

где $\nu = m/M = N/N_A$ — количество вещества в молях; $R = 8,31$ Дж/(моль·К) — молярная газовая постоянная. Это уравнение можно преобразовать к виду

$$p = \frac{N R}{V N_A} T = nkT, \quad (4.2)$$

где $n = N/V$ — концентрация молекул; $k = R/N_A = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — **постоянная Больцмана**, названная в честь австрийского физика-теоретика Л. Больцмана (1844—1906). Из формулы (4.2) следуют уравнения изотермического, изобарного и изохорного процессов, а также законы А. Авогадро, Д. Дальтона (1766—1844) и др.

И тем не менее без теории наука развиваться не может, поэтому немецкими физиками А. Кренигом (1822—1879) и Р. Клаузиусом (1822—1888) была предложена **молекулярно-кинетическая теория (МКТ)**, *объясняющая* поведение газа. В ее основу положены признаки **идеального газа**:

- 1) расстояния между молекулами много больше их размеров (следовательно, объем, занимаемый молекулами, много меньше объема газа);
- 2) взаимодействие между молекулами на расстоянии *отсутствует*, а сталкиваются они *упруго*;
- 3) движение молекул беспорядочно, *хаотично*, их координаты, а также направления скоростей *равновероятны*.

Реальный газ близок к идеальному при небольших концентрациях молекул и относительно высоких температурах.

Такая модель при наличии ЭВМ возрождает мысль о расчете движения каждой из молекул в любой момент времени. Это предполагает, что система ведет себя однозначно, подчиняясь *динамическим закономерностям*. Однако если бы такой расчет и удался, мы не успели бы его даже осознать, как он потерял бы всякий смысл: при нормальных условиях одна молекула совершает $\sim 10^9$ столкновений в секунду, а в 1 см³ находится $\sim 10^{19}$ молекул! Это означает, что удары молекул *мгновенно* стирают память о предыдущем состоянии газа и приводят к молекулярному хаосу. Здесь требуются совершенно иные подходы.

Если бросать монету N раз, то из них N_p раз выпадет «решка», причем величина $w = N_p/N$ может оказаться любой. Однако если N увеличивать, то значение w будет стремиться к 0,5 — оно характеризует **вероятность** выпадения «решки». Таким образом, *вероятность события определяет ожидаемую частоту его повторения при большом числе испытаний.*

Закономерности, основанные на оценке вероятности событий, называются **статистическими**. Они применимы и к системе молекул.

Пусть сосуд содержит четыре молекулы. Возможные комбинации их распределения по половинам объема сосуда представлены на рис. 4.1. Здесь учтено, что если в левой половине находятся молекулы с номерами 1, 3, а в правой — 2, 4, то это одно микросостояние системы, а если наоборот, то другое. В отличие от этого **макросостояние системы** определяет лишь **число** молекул в каждой половине сосуда *безотносительно к их номеру*. Отсюда ясно: чем больше возможно микросостояний системы молекул при данном ее макросостоянии, тем больше его вероятность, которую называют **статистическим весом**.

				6				
				34	12			
			4	24	13	4		
		234	1	23	14	1	234	
		134	2	14	23	2	134	
		124	3	13	24	3	124	
1	1234	123	4	12	34	4	123	1234

Рис. 4.1

Из рис. 4.1 следует, что наиболее вероятное распределение молекул по объему сосуда — *равномерное*, и чем больше в сосуде молекул, тем точнее этот прогноз. В представленном случае нехватка в левой половине сосуда одной молекулы встречается в полтора раза реже, чем точное равенство. Однако если молекул не четыре, а, например, 10^4 (что гораздо меньше, чем при нормальных условиях), то перекося даже в 5% будет возникать в 10^{22} (!) раз реже равномерного распределения. Это значит, что статистический хаос является в некоторых отношениях очень точной формой существования материи. В ней проявляется *диалектическое единство необходимого и случайного*, а также *закон перехода количества в качество*: слишком большой беспорядок приводит к новому порядку.

Статистические закономерности являются весьма мощным средством анализа, например *при измерениях* какой-либо физической величины. Ввиду действия многих случайных факторов получить ее точное значение невозможно, однако к нему можно приближаться, увеличивая число измерений и обрабатывая результаты статистическими методами (этому учат в лабораторном практикуме).

Хаотичность движения молекул приводит к соответствующему хаосу импульсов, передаваемых молекулами какой-либо частице. Если ее размер велик ($> 5 \cdot 10^{-6}$ м), то число молекул, ударяющих о ее поверхность, огромно, и потому отклонение векторной суммы импульсов от нуля так же маловероятно, как и отклонение концентрации молекул от равномерного рас-

пределения. Если же частица мала, то результирующие импульсы хаотично меняются во времени, вызывая хаотичные перемещения частицы, названные **броуновским движением**, по имени британского ботаника Р. Броуна (1773—1858), наблюдавшего в микроскоп движение пылцы растений. Это наглядное доказательство хаотического (теплового) движения молекул, лежащего в основе МКТ.

4.2. Давление и температура

Итак, газ *самопроизвольно* устанавливает одинаковую концентрацию молекул, а также давление и температуру, и отклонения от такого состояния маловероятны.

Состояние системы, при котором его параметры постоянны в пространстве и во времени, называется **тепловым равновесием**.

Казалось бы, при тепловом равновесии скорости (энергии) молекул также должны быть одинаковыми, но это не так. Некоторые из них в каждом из последовательных ударов *отдают* собственную энергию, снижая ее вплоть до нуля. Другие, наоборот, при каждом ударе *получают* приращение энергии вплоть до очень больших значений. Ясно, однако, что такие случаи редки, большинство молекул при ударах то отдает, то получает энергию и имеет скорости между очень маленькими и очень большими. Отсюда следует, что зависимость числа молекул, имеющих некоторую скорость, от ее модуля должна иметь некий колоколообразный вид.

От импульса молекул зависит и давление газа, рассчитанное Р. Клаузиусом. Расчет основан на сочетании основ МКТ и законов динамики и дает весьма яркий эффект.

На основании формул (1.35), (1.36) и (2.40) сила, действующая на стенку, перпендикулярную оси x , которая возникает вследствие удара одной молекулы, равна

$$F = \frac{2mv_x}{\Delta t}, \quad (4.3)$$

где v_x — x -компонент скорости молекулы при любых других y - и z -компонентах.

Оценим, сколько таких ударов об участок стенки площадью 1 м^2 произойдет за время Δt . Максимальное расстояние, с которого молекула, имеющая скорость v_x , успеет достичь стенки за время Δt , равно $v_x \Delta t$ (рис. 4.2). Следовательно, общее число ударов молекул, имеющих скорость v_x , за время Δt равно их числу в объеме цилиндра. Если их концентрация dn_{v_x} , то из них $dn_{v_x}/2$ движется в направлении оси x (см. рис. 4.2) и столько же в обратном направлении, т.е. $dN_{v_x} = dn_{v_x} v_x \Delta t / 2$, а давление, которое они оказывают:

$$dp_{v_x} = 2mv_x dN_{v_x} / \Delta t = mv_x^2 dn_{v_x}.$$

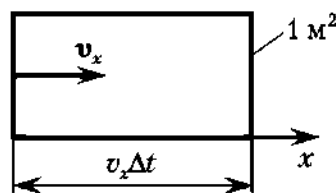


Рис. 4.2

Чтобы найти *полное* давление, пужно проинтегрировать это выражение по всем v_x :

$$p = \int_{v_x=0}^{\infty} m v_x^2 dn_{v_x} = 2n \left(\frac{1}{n} \int_{v_x=0}^{\infty} \frac{m v_x^2}{2} dn_{v_x} \right), \quad (4.4)$$

где последнее выражение получено умножением и делением на $2n$. В скобках имеем *среднюю энергию поступательного движения по координате x* .

Поскольку $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$, то, усредняя, получим $v_{xcp}^2 = v_{ycp}^2 = v_{zcp}^2 = v_{cp}^2/3$, то

$$p = 2n \frac{m v_{xcp}^2}{2} = \frac{2}{3} n \frac{m v_{cp}^2}{2} = \frac{2}{3} n E_{cp}, \quad (4.5)$$

где E_{cp} — **средняя энергия хаотического поступательного движения молекул**. Давление (4.5) действует как на стенку, так и на любое тело внутри газа, со стороны одних частей газа на другие и т.д., т.е. это *внутреннее давление газа*, которое в соответствии с законом Паскаля одинаково по всем направлениям.

Формула (4.5) явилась весьма серьезным достижением МКТ. Она не только подтверждает экспериментально полученную связь $p \sim n$, но и расшифровывает понятие «температура» (лат. *temperatura* — смесь), которое долгое время было загадочным. Этот термин произошел от смешивания лекарств, которым приписывали тепловое действие.

Прообраз **термометра** изобрел еще Г. Галилей, а Х. Гюйгенс и Р. Гук предложили постоянные точки его шкалы — температуры таяния льда и кипения воды. В XVII в. немецкий физик Д. Г. Фаренгейт (1686—1736) создал спиртовой и ртутный термометры, но что именно измеряет термометр, так и оставалось неизвестным. Термометры и до сих пор измеряют не саму температуру, а тот или иной *термометрический параметр*, который от нее зависит, например объем столбика ртути или газа, т.е. измерения температуры относятся к *косвенным* измерениям. С другой стороны, непонимание физического смысла температуры не мешало ей пользоваться. Если при $t \approx 39^\circ\text{C}$ человек болен, а при $t \approx -39^\circ\text{C}$ ртуть замерзает, то термометр полезен независимо от того, что означают его деления. Тут уместно высказывание русского философа и публициста Д. И. Писарева (1840—1868): «Иллюзии и слова гибнут, факты остаются». МКТ выявила важный факт в виде понимания *смысла температуры!*

Из сравнения формул (4.4) и (4.5) с уравнением (4.2) следуют соотношения

$$\frac{m v_{xcp}^2}{2} = \frac{1}{2} kT, \quad (4.6)$$

$$E_{xcp} = \frac{m v_{cp}^2}{2} = \frac{3}{2} kT. \quad (4.7)$$

Эти замечательные выражения свидетельствуют: *абсолютная температура — это мера средней кинетической энергии молекул*.

При $T = 0$ $E_{xcp} = 0$, т.е. всякое движение молекул прекращается (много позже — в квантовой физике — выяснилось, что это не так).

Выражения (4.6), (4.7) позволяют также сопоставить энергию движения молекул по *разным направлениям*. Вообще, число i независимых друг от друга движений любого тела (его независимых координат) называется числом его **степеней свободы**. Например, *одноатомная* молекула, рассматриваемая как частица, имеет *три степени свободы* — по трем, например декартовым, координатам. Как следует из формулы (4.6), на каждую из них приходится средняя энергия $kT/2$. Если молекула двухатомная (подобна гантели), то ее центр инерции может перемещаться по тем же трем независимым координатам, а положение оси, соединяющей атомы, может быть задано двумя углами, которые определяют ее *вращательные* степени свободы. Итого $i = 5$. Если еще и расстояние между атомами может изменяться (подобно растяжению-сжатию), то добавляются *колебательные* степени свободы и т.д. Во всех случаях выполняется общий принцип (он проявился уже в формулах (4.6), (4.7) для поступательного движения), установленный Клаузиусом и выдающимся британским физиком Дж. Максвеллом (1831–1879), основателем известной Кавендишской лаборатории в Кембридже: *средняя энергия равномерно распределяется между степенями свободы, на каждую из которых приходится энергия $kT/2$* .

Исключение составляет колебательная степень свободы, в которой присутствуют два независимых друг от друга вида энергии — кинетическая и потенциальная, и потому на нее приходится средняя энергия kT . Итак,

$$E_{\text{ср}} = \frac{i}{2}kT. \quad (4.8)$$

Механизм равнораспределения энергии по степеням свободы состоит в том, что молекулы путем столкновений перескачивают энергию с тех степеней свободы, где она почему-либо оказалась больше, к тем, где она меньше. Например, поток молекул внутри газа постепенно рассеивает энергию однонаправленного движения по другим степеням свободы.

4.3. Распределение Максвелла и Больцмана

Среди скоростей молекул можно встретить почти *любые* значения. «Почти» — потому что число носителей скоростей хотя и огромно, но все же ограничено. Для анализа удобнее «вырезать» из ансамбля те Δn_v молекул, которые имеют скорости в определенном интервале — от v до $v + \Delta v$. При этом $n = \sum_v n_v$ конечна, а $p_v = \Delta n_v/n$ есть *вероятность* обнаружить молекулу со скоростью, находящейся в названном интервале. Чтобы выявить зависимость p_v от разных v , нужно исключить ее зависимость от ширины Δv интервала, т.е. для всех v рассматривать один и тот же *единичный* интервал скоростей:

$$f(v) = \frac{p_v}{\Delta v} = \frac{1}{n} \frac{\Delta n_v}{\Delta v}. \quad (4.9)$$

Функция $f(v)$ называется **плотностью вероятности**. Точно так же, например, обычную плотность ρ определяют массой в *единичном объеме*: $\rho = \Delta m/\Delta V$, несмотря на то что масса Δm есть сумма масс *отдельных* частиц. При переходе $\Delta v \rightarrow dv$ функция $f(v)$ принимает вид, показанный на рис. 4.3:

$$f(v) = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{1}{n} \frac{\Delta n_v}{\Delta v} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dv}. \quad (4.10)$$

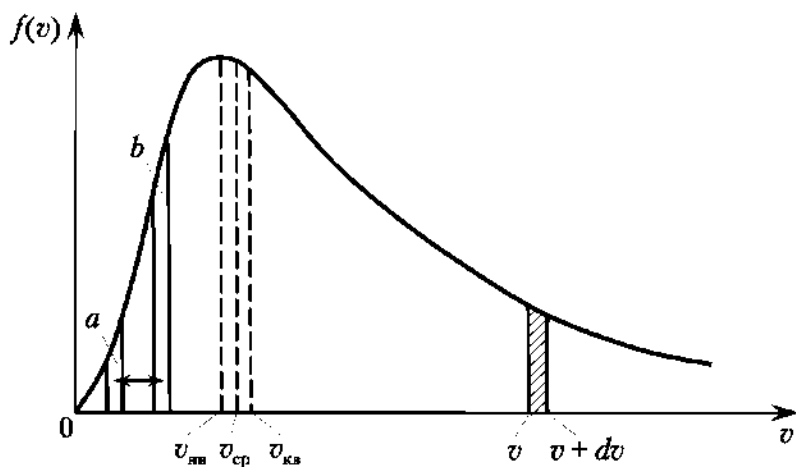


Рис. 4.3

Как следует из формулы (4.10), площадь заштрихованного на рис. 4.3 участка равна

$$f(v)dv = \frac{dn}{n}. \quad (4.11)$$

Она равна доле молекул, скорости которых лежат в интервале от v до $v + dv$. Соответственно, площадь *под всей кривой* определяет долю молекул со скоростями от 0 до ∞ , поэтому она равна *единице*.

Зависимость плотности вероятности любой случайной величины от ее значения называется ее **функцией распределения**. Кривая, представленная на рис. 4.3, является функцией распределения скорости молекул. Для молекул идеального газа ее теоретически получил Дж. Максвелл, который впервые ввел статистику в описание физических явлений. Она имеет вид

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}}. \quad (4.12)$$

Именно это **распределение Максвелла** и показано на рис. 4.3. Его максимум приходится на скорость $v = v_{\text{мв}}$.

ВОПРОС. Каков физический смысл скорости $v_{\text{мв}}$?

ОТВЕТ. Поскольку доля молекул, имеющих такую скорость, максимальна, это **наивероятнейшая скорость**.

Ее значение можно найти как и всякий экстремум, взяв производную по v функции (4.12) и приравняв ее нулю. В результате получим

$$v_{\text{мв}} = \sqrt{2kT/m}. \quad (4.13)$$

Например, для молекул водорода при 0°C $v_{\text{мв}} \sim 1500$ м/с. Для многих расчетов важна также **средняя скорость** $v_{\text{ср}}$ (или \bar{v}):

$$v_{\text{ср}} = \frac{1}{n} (v_1 \Delta n_1 + v_2 \Delta n_2 + \dots + v_n \Delta n_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \Delta n_i, \quad (4.14)$$

где предполагается, что скорость v_i имеют Δn_i молекул. Учитывая смысл функции распределения, получим

$$v_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \int_0^{\infty} v dn_v = \int_0^{\infty} v f(v) dv = \sqrt{8kT/(\pi m)}, \quad (4.15)$$

где использовано соотношение (4.12). Поскольку распределение Максвелла несимметрично (правая ветвь более полого), $v_{\text{cp}} > v_{\text{нв}}$. Таким же образом можно найти среднее значение любой другой характеристики ансамбля молекул, подставляя ее в подинтегральное выражение (4.15) вместо v , например значение v^2 . Корень из такого интеграла называют **средней квадратичной скоростью** $v_{\text{кв}}$. Она определяет среднее значение *энергии* молекул:

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{\int_0^{\infty} v^2 f(v) dv} = \sqrt{3kT/m}. \quad (4.16)$$

Главную роль в установлении всех этих скоростей играют столкновения молекул. **Среднюю частоту столкновений** можно определить исходя из средней скорости молекул и их диаметра d :

$$z_{\text{cp}} = \sqrt{2} v_{\text{cp}} \pi d^2 n. \quad (4.17)$$

Это определяет и средний путь между двумя последовательными столкновениями, который называется **средней длиной свободного пробега**:

$$\lambda_{\text{cp}} = \frac{v_{\text{cp}}}{z_{\text{cp}}} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n}. \quad (4.18)$$

Как следует из формулы (4.2), при $T = \text{const}$ $n \sim p$, и потому $\lambda_{\text{cp}} \sim 1/p$. Например, в воздухе при нормальных условиях ($p_0 = 760$ мм рт. ст. = 101,325 кПа, $T_0 = 273$ К) $\lambda_{\text{cp}} \sim 10^{-7}$ м.

Максвелловское распределение устанавливается при тепловом равновесии в системах невзаимодействующих или упруго взаимодействующих частиц, движение которых подчинено законам классической механики: газы, некоторые жидкости, броуновские частицы и т.д. Несмотря на то что молекулы при столкновениях постоянно меняют свою скорость, максвелловское распределение *стационарно* (не изменяется во времени), поскольку в нем поддерживается **динамическое равновесие**. Если в результате столкновений какая-то часть молекул перешла из элементарного интервала скоростей a в интервал b (см. рис. 4.3), то за это же время ровно такая же часть переходит в обратном направлении.

Как это принято в физике, после рассмотрения идеализированной модели в нее вносят поправки. Молекулы атмосферы, например, находятся в поле тяготения Земли. Влияет ли это на ее характеристики? Да, еще Б. Паскаль в XVII в. установил, что с ростом высоты атмосферное давление падает.

Мысленно вычленим цилиндр с вертикальной осью h . При площади его горизонтального сечения 1 м^2 силы, действующие на нижнее 1 и верхнее 2 основания, равны давлениям p_1 и p_2 . В равновесном состоянии $p_1 = p_2 + nmgdh$, где второй член правой части — сила тяжести газа, заключенного в цилиндре; n — концентрация молекул; m — масса одной молекулы. Отсюда $dp = p_2 - p_1 = -nmgdh = kTdn$, где последнее следует из формулы (4.2) с учетом

равенства $T = \text{const}$. Таким образом, $dn/n = -mgdh/(kT)$. При конечном перепаде высоты от 0 до h

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = -\frac{mg}{kT} \int_0^h dh, \quad (4.19)$$

где n_0 — концентрация молекул на высоте $h = 0$. Отсюда

$$n = n_0 e^{-\frac{mgh}{kT}} = n_0 e^{-\frac{E_n}{kT}}. \quad (4.20)$$

Как видим, концентрация n молекул по мере повышения их потенциальной энергии экспоненциально уменьшается. При этом на всех высотах сохраняется максвелловское распределение молекул по энергиям.

Последнее выражение в формуле (4.20) имеет более общий вид. Оно относится уже не только к силе тяжести и распространяет полученный результат на разные виды частиц в разных потенциальных полях, например на заряженные частицы в электростатическом поле.

Формула (4.20) называется **распределением Больцмана**. Им пользуются при анализе аэродинамики летательных аппаратов; термического воздействия на их обшивки; расхода топлива при запуске ракет; работы двигателей внутреннего сгорания в горных условиях и т.д. Для частного случая $E_n = mgh$ с учетом формулы (4.2) формуле (4.20) можно придать вид

$$p = p_0 e^{-\frac{mgh}{kT}}. \quad (4.21)$$

В этом варианте ее называют **барометрической формулой**, поскольку она характеризует зависимость *давления* атмосферы от высоты. Приборы, основанные на соотношении (4.21), называют **альтиметрами** и применяют, например, в авиации (в действительности формула сложнее, так как с ростом высоты в диапазоне 0–10 км температура воздуха линейно убывает примерно до -50°C).

Заканчивая рассмотрение МКТ, заметим, что *реальные газы и пары* при давлениях в сотни атмосфер или температурах, близких к температуре конденсации, не соответствуют ее исходным положениям. Объем, занимаемый молекулами, становится соизмерим с объемом межмолекулярного пространства. Его объем становится равным $V - Nb$, где b — объем одной молекулы. Кроме того, сказывается и взаимное притяжение молекул.

Если молекулу, ударяющую о стенку, притягивают другие молекулы газа, то сила притяжения направлена *от стенки* и потому уменьшает давление p . Модуль результирующей силы F (рис. 4.4) пропорционален числу молекул в полусфере радиуса R , в пределах которой сказывается их взаимное притяжение, и, следовательно, их концентрации: $F \sim n$. Поэтому поправка к формуле (4.2), связанная с *одной* молекулой: $\Delta p_i \sim n$, а связанная с давлением со стороны *всех* молекул: $\Delta p = n\Delta p_i \sim n^2 = an^2$, где a — коэффициент пропорциональности. С учетом названных факторов уравнение состояния принимает вид

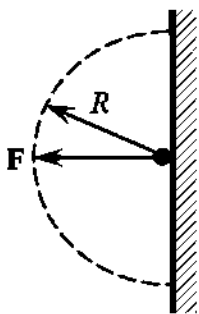


Рис. 4.4

$$p = \frac{NkT}{V - Nb} - an^2. \quad (4.22)$$

Эта формула называется **уравнением Ван-дер-Ваальса** — по имени нидерландского ученого Й. Д. Ван дер Ваальса (1837—1923, Нобелевская премия 1910 г.) получившего его эмпирическим путем.

4.4. Процессы переноса

ВОПРОС. Почему если в гараже открыли канистру с бензином, то его запах почувствуется на расстоянии от нее?

ОТВЕТ. Потому что молекулы бензина от горла канистры распространяются в воздухе. Это означает, что система воздух — бензин определению теплового равновесия не соответствует. То же можно сказать о распространении частиц радиоактивного облака или облака отравляющих газов — запрещенного теперь оружия. То же происходит при смешивании разнородных жидкостей и т.д. Подобные процессы весьма распространены, играют важную роль в различных явлениях и потому требуют количественного рассмотрения.

Для упрощения анализа рассмотрим изменение концентрации молекул n по одной координате x при $T = \text{const}$ (рис. 4.5).

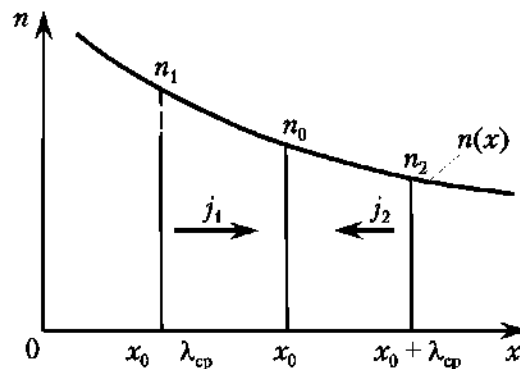


Рис. 4.5

Подобно тому как это сделано на рис. 4.2, представим параллелепипед с единичной площадью грани, перпендикулярной оси x , а его ребро, параллельное оси x , имеет длину $v_{\text{cp}} \Delta t$, где v_{cp} — средняя скорость молекул. Если $v_{\text{cp}} \Delta t < \lambda_{\text{cp}}$, то в объеме параллелепипеда столкновений между молекулами практически нет. Тогда за время Δt через грань пройдет $1/6$ часть молекул, находящихся в его объеме: $N = n v_{\text{cp}} \Delta t / 6$. Остальные движутся в направлении пяти других граней. Отсюда плотность молекулярного потока по любому направлению:

$$j = \frac{N}{\Delta t} = \frac{1}{6} n v_{\text{cp}} \quad (4.23)$$

Теперь сопоставим потоки молекул j_1 и j_2 через какое-либо сечение x_0 (см. рис. 4.5). По разные стороны от x_0 концентрации n_1 и n_2 различны, и поэтому результирующая плотность потока равна

$$j = j_1 - j_2 = \frac{1}{6} (n_1 - n_2) v_{\text{cp}} = -\frac{1}{6} \Delta n v_{\text{cp}},$$

где $\Delta n = n_2 - n_1$. Поскольку λ_{cp} весьма мала, Δn можно представить в виде

$$\Delta n = \frac{dn}{dx} \Delta x = \frac{dn}{dx} [x_0 + \lambda_{\text{cp}} - (x_0 - \lambda_{\text{cp}})] = \frac{dn}{dx} 2\lambda_{\text{cp}}, \quad (4.24)$$

где dn/dx — производная функции $n(x)$ в точке x_0 . Отсюда

$$j = \frac{\Delta n}{\Delta t} = -D \frac{dn}{dx}, \quad (4.25)$$

где $D = \frac{\lambda_{\text{ср}} v_{\text{ср}}}{3}$, а знак «минус» отражает тот факт, что $j > 0$ при $dn/dx < 0$. Умножив обе части равенства (4.25) на массу m одной молекулы, получим

$$j_m = -D \frac{d\rho}{dx}, \quad (4.26)$$

где j_m — плотность потока массы; ρ — плотность газа.

Поток молекул в сторону убывания их концентрации называется **диффузией**.

Формула (4.26) называется **законом Фика**, а коэффициент D в (4.25), (4.26) — **коэффициентом диффузии**. Его расчет можно произвести и более точно, если учесть распределение молекул по скоростям и длинам свободного пробега, однако результат получится тот же.

Подчеркнем, что соотношение (4.25) справедливо только при малых $\Delta n/\Delta x$. В противном случае в формуле (4.24) нельзя пользоваться только первой производной. Это замечание весьма существенно для многих процессов (см. параграфы 4.5, 12.4).

Поскольку $\lambda_{\text{ср}} \sim 1/n$, а $v_{\text{ср}} \sim \sqrt{T/m}$, то $D \sim \sqrt{T/m}/n$. Это означает, что в горячих, разреженных и легких газах диффузия происходит быстрее. При нормальных условиях, например, для диффузии паров воды в воздухе, $D = 0,23 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Диффузия возникает не только в смесях (*взаимная диффузия*), но и в среде однородных молекул (*самодиффузия*). Из механизма диффузии ясно, что ее причина — хаотическое движение молекул.

Поскольку диффузия выравнивает концентрацию молекул по объему, она способствует установлению теплового равновесия. Период выравнивания называется **временем релаксации** — оно уменьшается с ростом коэффициента D и уменьшением размеров L области неоднородности. Из этих соображений и с учетом размерностей τ_d , D и L получаем оценку

$$\tau_d \sim L^2/D. \quad (4.27)$$

Из формулы (4.27), например, при самодиффузии в CO_2 ($D \approx 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$) в области размером $\sim 0,1$ м получаем $\tau_d \sim 10^3$ с, т.е. диффузия — процесс весьма медленный. Ее скорость $v_d = L/\tau_d \approx D/L$. Например, для рассмотренного случая $v_d \sim 10^{-4}$ м/с, что на много порядков меньше тепловой скорости молекул. Подобно рою комаров под легким ветром, молекулы очень быстро и хаотично движутся во всех направлениях и медленно перемещаются в направлении убывания концентрации. Диффузия в жидкостях на несколько порядков медленнее, чем в газах, а в твердых телах на несколько порядков медленнее, чем в жидкостях, и тем не менее ее проявления повсеместны и весьма важны. Она ответственна за образование рабочей смеси топлива с воздухом в двигателе внутреннего сгорания (для ускорения их перемешивания повышают температуру впускного коллектора). Диффузия заряженных частиц влияет на электрические свойства газов, электро-

литов, полупроводников и т.д. Поскольку скорость диффузии зависит от массы молекул, ею можно пользоваться для разделения компонентов смеси газов. Это осуществляли, например, при создании ядерной бомбы, разделяя изотопы урана ${}^{238}_{92}\text{U}$ и ${}^{235}_{92}\text{U}$ и обогащая последним ядерный заряд (см. параграф 11.5).

Тепловое равновесие может быть нарушено и перепадом температуры.

Процесс переноса теплоты, направленный в сторону убывания температуры, называется **теплопроводностью**.

Закон Фурье для плотности потока теплоты имеет вид, весьма похожий на (4.26), поскольку в основе теплопроводности лежит то же самое хаотическое движение молекул. Теплопроводность — это, в сущности, диффузия их тепловой энергии:

$$j_Q = \frac{dQ}{dt} = -\chi \frac{dT}{dx}, \quad (4.28)$$

где χ называется **коэффициентом теплопроводности**. Как и диффузия, теплопроводность — процесс относительно медленный и зависящий от свойств вещества.

Примеры практики

Газы обладают низкой теплопроводностью, что используют для теплоизоляции: оконные рамы, пористые материалы, одежда (чем больше в ткани воздушных пустот, тем она лучше теплоизолирует). Ювелиры знают, что поддельные бриллианты имеют много меньшую теплопроводность, чем настоящие. Теплопроводность металлов много выше, чем газа, поэтому из них изготавливают устройства для эффективной передачи теплоты (батареи отопления, радиаторы охлаждения и т.п.).

Нагревание тел производится обычно с поверхности, откуда теплота «перетекает» в объем. В связи с этим действие, например, лазерного оружия в системе противоракетной обороны зависит от соотношения времени τ действия лазерного импульса и времени релаксации температуры τ_r обшивки корабля или ракеты. Если $\tau < \tau_r$, то в течение времени τ плавится только поверхность и испаряемый материал создает отдачу — реактивный удар. Если же $\tau > \tau_r$, то возникает прожигание стенки.

ВОПРОС. В стволе оружия температура газов ~ 3000°C, что много больше температуры плавления стали (1400°C). Почему же ствол не плавится?

ОТВЕТ. Снаряд покидает ствол за время много меньшее, чем τ_r . После того как давление пороховых газов совпадет с атмосферным, в стволе остается лишь незначительная их часть. Однако при высоком темпе стрельбы отдельные тепловые импульсы дают заметную среднюю составляющую, и ствол может сильно нагреваться. В таких случаях приходится выжидать, пока он остынет, или применять специальные системы охлаждения.

Вследствие повышения перепада температуры dT/dx зимой скорость теплоотвода выше. Следовательно, температура ствола и, соответственно, давление пороховых газов понижаются. Это влияет на начальную скорость пули и КПД оружия. Для получения той же дальности оружия охотники применяют зимние варианты стволов, которые на несколько сантиметров длиннее летних, а снайперы делают поправки дальности на температуру воздуха (по соответствующим таблицам).

Тепловое равновесие нарушается и движением тел.

ВОПРОС. Почему опасно находиться вблизи тонущего судна?

ОТВЕТ. Слой воды, прилегающий к судну, имеет ту же скорость, что и его борт. Молекулы этого слоя передают импульс направленного движения молекулам следующего слоя и т.д. По той же причине чувствуется ветер от проехавшего мимо транспорта.

Диффузия импульса направленного движения называется **вязкостью**.

Закон Ньютона для плотности потока импульса имеет вид, также похожий на формулу (4.26):

$$j_p = \frac{\Delta p}{\Delta t} = -\eta \frac{du}{dx}, \quad (4.29)$$

где η называется **динамической вязкостью**.

Поскольку $\Delta p/\Delta t$ имеет размерность силы, уравнение (4.29) определяет силу сопротивления F_c среды. Если тело погружается в жидкость со скоростью u в бассейне шириной d , то при линейном изменении направленной скорости жидкости от тела к стенкам $du/dx \sim u/d$. Тогда формула (4.29) принимает вид

$$F_c = ku, \quad (4.30)$$

где коэффициент пропорциональности k определяется свойствами тела и среды. Например, для падающего тела уравнение движения с учетом F_c будет

$$F_T + F_A + F_c = ma. \quad (4.31)$$

Здесь $F_T = g\rho_T V$ — модуль силы тяжести (ρ_T , V — плотность и объем тела); $F_A = g\rho_{cp} V$ — модуль силы Архимеда (ρ_{cp} — плотность среды); F_c — модуль силы сопротивления среды. При установившейся скорости падения ($a = 0$) получаем

$$g(\rho_T - \rho_{cp})V = ku. \quad (4.32)$$

Например, для шарика (формула Стокса): $k = 6\pi\eta r$, где r — радиус шарика; η — динамическая вязкость среды. Таким образом, по известным ρ_T , ρ_{cp} , V , измерив u , можно определить η , что и делают, например, при измерении динамической вязкости масел (это осуществляют в лабораторном практикуме). У газов вязкость растет с ростом температуры, а у жидкостей зависимость от температуры обратная, например у автомобильных масел при *понижении* температуры от 120 до 20°C она *возрастает* в $\sim 10^4$ раз! У некоторых веществ вязкость увеличивается до такой степени, что жидкость становится похожей на твердое тело (смола, канифоль, стекло и т.д.). Такое состояние вещества называют **аморфным**.

Итак, диффузия — это *перенос* молекул, теплопроводность — их *энергии*, а вязкость — направленного импульса. Процессы переноса *рассеивают* всякие отклонения от средних значений параметров состояния и потому называются **диссипативными** (лат. *dissipatio* — рассеивание). Они играют огромную роль не только в природе и технике, но и в явлениях самоорганизации материи (см. параграф 12.4).

4.5. Турбулентности

Замечание, сделанное в отношении закона Фика, распространяется и на другие законы переноса: их уравнения справедливы только для малых перепадов переносимого признака, что далеко не всегда соответствует реальности. Если же перепады велики, то хаотические столкновения молекул уже не могут обеспечить те потоки массы, теплоты или направленной скорости, которые требуются для их выравнивания. В этих случаях «плавные» процессы, происходящие на молекулярном уровне, переходят в «бурные» макроскопические **турбулентности**. Они значительно быстрее выравнивают параметры состояния системы и могут приводить к весьма необычным явлениям (см. параграф 12.4).

При малых скоростях u , когда справедливы формулы (4.29), (4.30), течение жидкости или воздуха **ламинарное** (слоистое) — линии тока плавно обтекают поверхность тела, повторяя его очертания (рис. 4.6, *а*). При возрастании скорости хаотическое движение молекул из слоя в слой уже не может удержать конфигурацию линий тока, и возникают вихри, обратные течения и т.п. (рис. 4.6, *б*). Такой «срыв потока» наглядно иллюстрируют сухие листья, которые кружат за автомобилем, следуя линиям вихрей. Подобное течение называют **турбулентным**. Переход от одного вида течения к другому определяется критическим значением безразмерного **числа Рейнольдса** $Re = \rho Lu / \eta$, где ρ , η — плотность и динамическая вязкость среды; L — характерный линейный размер тела, относительно которого движется среда. При $Re < Re_{кр}$ течение ламинарное, при $Re > Re_{кр}$ — турбулентное, а порядок значения $Re_{кр} \sim 10^3$.

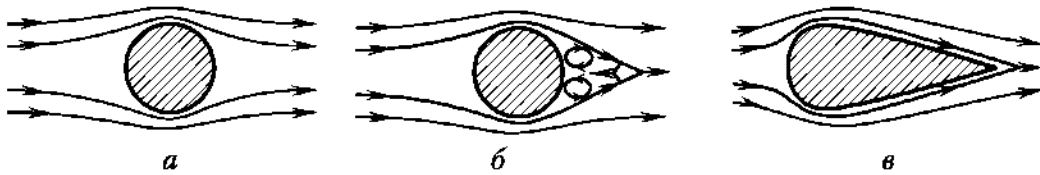


Рис. 4.6

В турбулентных вихрях, образующихся позади тела (см. рис. 4.6, *б*), молекулы газа (жидкости) за то же время проходят больший путь, чем при ламинарном течении в «носовой» части тела, а при возрастании скорости в соответствии с уравнением Бернулли (см. параграф 2.4) давление падает. Следовательно, перепад давления, т.е. сила сопротивления движению, возрастает. Значение скорости, при котором начинаются завихрения, можно увеличить, повышая значение $Re_{кр}$. Для этого телу придают обтекаемую форму: закругленные поверхности, сходящиеся сзади на нет (рис. 4.6, *в*). При такой форме (дельфин, автомобиль, ракета, подводная лодка) вихри образуются при больших скоростях. Кроме формы, важна гладкость поверхности, поскольку раковины и шероховатости служат центрами образования вихрей.

При турбулентном течении зависимость силы сопротивления от скорости более резкая, чем при ламинарном, — не линейная, а квадратичная:

$$F_c = k_1 u^2, \quad k_1 = 0,5cS\rho_{ср}, \quad (4.33)$$

где S — так называемое *миделево сечение* — наибольшая площадь поперечного сечения тела в направлении, перпендикулярном потоку; c — безраз-

мерный коэффициент лобового сопротивления, который зависит от формы тела (табл. 4.1).

Для большинства тел, движущихся в воздухе, силой Архимеда можно пренебречь. Тогда, приравнявая F_c из формулы (4.33) к силе тяжести, получим установившуюся скорость

$$u = \sqrt{\frac{2mg}{cS\rho_{\text{сп}}}}. \quad (4.34)$$

Таблица 4.1

Значения некоторых коэффициентов c лобового сопротивления

Форма тела	Коэффициент c
Каплевидное тело	0,01
Парашютист головой вниз с сомкнутыми руками и ногами	0,15
Парашютист плашмя лицом вниз с разведенными руками	0,3
Купол парашюта круглой формы	0,9

Примеры практики

1. Горизонтальная составляющая силы (4.33), действующая на боковую поверхность снаряда, превращает его равномерное движение по этому направлению в замедленное. Поскольку сила зависит от скорости, тормозящее ускорение постоянно уменьшается. Вертикальная составляющая силы F_c на восходящей части траектории направлена в ту же сторону, что и сила тяжести. Она *уменьшается* при подъеме, но при спуске возрастает. Это вызывает ряд последствий для баллистики: время падения снаряда из высшей точки траектории больше времени подъема к ней; дальность полета снаряда уменьшается; нисходящая ветвь траектории короче и круче восходящей, реальный угол возвышения для наибольшей дальности меньше теоретического угла 45° и составляет $\sim 35^\circ$; угол падения больше угла возвышения; конечная скорость снаряда меньше начальной. Например, для пули калибра 7,62 мм, выпущенной из бронетранспортерного пулемета Калашникова при угле возвышения 30° , дальность полета и высота траектории, рассчитанные теоретически без учета вязкого трения, составляют 59 и 9 км. В то же время реальные значения этих величин — 3,8 и 0,9 км соответственно.

Турбулентности относятся не только к *вязкому трению*, но и к другим явлениям переноса.

2. Пусть поверх воды налит слой серной кислоты. Казалось бы, она должна диффундировать в воду вплоть до образования однородной смеси. Однако у серной кислоты плотность больше, чем у воды, центр масс системы выше возможного, а согласно *принципу минимума энергии* всякая система стремится к положению с минимальной энергией. Поэтому малейший флуктуационный провал верхнего слоя в нижний приводит к тому, что туда же устремляются и другие объемы серной кислоты. В результате пограничные слои в разных местах переворачиваются, перемешиваются, а поскольку реакция экзотермическая, то возможны местные разогревы, вскипания и опасные выбросы. Поэтому приготовление аккумуляторного электролита осуществляют, добавляя к воде малые порции серной кислоты и перемешивая образующуюся смесь для более равномерного разогрева (добавлять воду к серной кислоте опасно, так как она сразу вскипает из-за малой теплоемкости небольших ее объемов и провоцирует те же выбросы).

Неустойчивые тепловые эффекты возникают и в однородных системах. При нагревании жидкости или газа теплообмен происходит в результате механического перемешивания горячих и холодных слоев, которое называется **конвекцией**.

4.6. Первый закон термодинамики

МКТ — не единственный способ рассмотрения многокомпонентных систем (вещества). Существует и другой — термодинамический — метод, который восходит к стремлению человека использовать теплоту для совершения работы.

Исторический экскурс

К первым осмысленным применениям теплоты можно отнести костер пращуров, производящий работу по формированию обогревающих конвенционных потоков воздуха. Можно вспомнить и медную металлургию Древнего Египта, и самый древний бронзовый меч, датируемый 4 тыс. до н.э., и античную (а затем и средневековую) алхимию, и горячий воздух монгольфов XVIII в., открывших эру воздухоплавания, и — главное — этапы создания тепловых машин.

Термодинамический метод опирается на закон сохранения энергии. Внутренняя энергия системы равна сумме энергий (4.8) всех N ее молекул:

$$U = N \frac{i}{2} kT = \frac{i}{2} \frac{N}{N_A} N_A kT = \nu \frac{i}{2} RT. \quad (4.35)$$

Энергия U может изменяться в результате совершения работы. В XVIII в. лорд Румфорд обратил внимание на то, что при сверлении стволов артиллерийских орудий они нагревались. Это означало, что теплота — особый вид движения.

Для количественных оценок рассмотрим силу $F = pS$, действующую на основание поршня площадью S . Если она перемещает его в цилиндре на dx , то

$$\delta A = pSdx = pdV, \quad (4.36)$$

где $dV = Sdx$ — изменение объема газа. При сжатии газа $dV < 0$, $\delta A < 0$, и поршень сообщает энергию ближайшим к нему молекулам. Они рассеивают ее среди других, повышая внутреннюю энергию газа. При обратном процессе $dV > 0$ — газ расширяется, совершая работу $\delta A > 0$ за счет своей внутренней энергии, и она вследствие этого уменьшается.

Как следует из формулы (4.36) и рис. 4.7, элементарная работа равна площади заштрихованного прямоугольника. При *конечном* изменении объема, например по схеме $V_2 - V_3 - V_5$, работа определяется интегралом, равным площади фигуры, ограниченной кривой 235 и осью V :

$$A = \int_{(235)} pdV. \quad (4.37)$$

Внутренняя энергия U газа может изменяться и в результате его нагревания-охлаждения, в том числе путем поглощения-излучения электромагнитных волн. Передача энергии без совершения работы называется **теплообменом**, а передаваемая путем теплообмена энергия хаотического движения молекул называется **теплотой**. Из закона сохранения энергии следует: по-

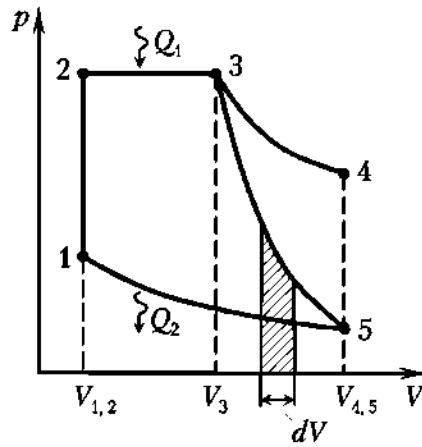


Рис. 4.7

лученная системой теплота расходуется на совершение ею работы и приращение ее внутренней энергии:

$$\delta Q = \delta A + dU. \quad (4.38)$$

Это уравнение выражает **первый закон термодинамики**, который, по историческим причинам, называют также *первым началом* термодинамики. Его сформулировал Р. Клаузиус, однако, по сути, он является законом сохранения и превращения энергии, который до него сформулировал Г. Л. Ф. Гельмгольц. Компоненты уравнения (4.38) — величины алгебраические: $\delta Q > 0$, если теплота *поступает в систему*; $\delta A > 0$, если *система совершает работу* против внешних сил. При обратных процессах знак меняется.

Различие символов d и δ в формуле (4.38) объясняется следующим. Любой точке на pV -диаграмме, например точке 2 (p_2, V_2) (см. рис. 4.7), соответствует совершенно определенное значение T_2 , а значит, и U_2 . Следовательно, внутренняя энергия U является *однозначной термодинамической функцией состояния системы и не зависит от пути перехода к этому состоянию*: $\Delta U_{235} = \Delta U_{215}$. А так как $\Delta U_{512} = -\Delta U_{215} = -\Delta U_{235}$, то $\Delta U_{235} + \Delta U_{512} = 0$, т.е. *при переходе по замкнутой траектории термодинамического процесса изменение внутренней энергии системы равно нулю*.

Аналогичный результат был получен в отношении потенциальной энергии (и работы) в поле тяготения (см. параграф 2.2). Итак,

$$\oint dU = 0.$$

С позиций математики эта формула означает, что dU является *полным дифференциалом* функции U , а он обозначается символом d . В отличие от этого *работа зависит не только от начального и конечного состояний системы, но и от траектории перехода между ними и, следовательно, от вида процесса*. Так, на пути 215 работа явно меньше, чем на пути 235 (разные площади под кривыми). Следовательно, δA — это не полный дифференциал, а только элементарное приращение, на что и указывает символ δ . Так как в правую часть формулы (4.38) входит δA , то и δQ уже не может быть полным дифференциалом. Действительно, в зависимости от происходящего в ней процесса системе нужно разное количество теплоты, чтобы перейти от одной температуры к другой. Это означает, что и *теплоемкость системы при разных процессах различна*.

Теплоемкость привязывают к молю вещества. Если C — теплоемкость произвольного тела, то молярная теплоемкость его вещества

$$c = \frac{C}{\nu} = \frac{1}{\nu} \frac{\delta Q}{dT}. \quad (4.39)$$

Уравнение (4.38) справедливо для *любых* процессов и служит теоретической основой конструирования тепловых машин, история которого уходит вглубь веков.

Исторический экскурс

Еще в I в. Герон Александрийский конструировал паровую турбину в виде шара, который вращался благодаря струям водяного пара, а Леонардо да Винчи (XV—XVI вв.) проектировал цилиндр с водой и поршнем, который в результате нагревания воды должен перемещаться паром и совершать полезную работу. В период XVII—XIX вв. появляются одноцилиндровая паровая машина для откачки воды из шахт (Т. Севери); двухцилиндровые паровые машины И. И. Ползунова и Дж. Уатта и, наконец, двигатели внутреннего сгорания (Н. Отто и Р.-А. Дизель).

Параллельно этим достижениям научно-технической мысли развивались и устройства военного назначения. Еще в V—IV вв. до н.э. греки использовали огонь, выбрасываемый по трубам в направлении защитных сооружений противника. Появившийся спустя многие столетия знаменитый греческий огонь (VII в.) относился не столько к механизму работы такой пушки, сколько к составу горючей смеси, гасить которую было сложно.

В III в. до н.э. Архимед построил пушку, стрелявшую уже с помощью пара. Он интуитивно использовал открытый позже закон Паскаля: на подвижную часть стенок сосуда действует то же давление пара, что и на другие, но при движении она совершает работу.

Исторически значимым толчком в развитии термодинамики оружия послужило изобретение пороха в Китае (приблизительно IX в., но существуют версии и о гораздо более раннем его происхождении, и не в одном Китае). В некоторых районах Китая селитра встречалась на поверхности и потому использовалась не только вместо соли, но и для различных экспериментов.

В X в. в Поднебесной появился уже и прообраз огнестрельного оружия — бамбуковое огненное копье, унаследованное затем европейскими оружейниками. Огнестрельное оружие Европы много старше тепловых машин мирного назначения. Если первые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) сконструированы в XIX в., то первые пушки были применены в Китае в XII в., и начиная со Средних веков они существенно изменили ход военных сражений. Их применение побудило разбираться с работой пороховых газов, соотношением масс заряда и снаряда, траекторией снаряда, материалами, конструкциями, инициацией выстрела и т.д. По мнению некоторых историков, это стало основным толчком к научному изучению реальности, вытесняющему предрассудки и заблуждения.

В некоторых отношениях огнестрельное оружие и тепловые машины развивались по разным траекториям. Если пушка осуществляет относительно простое *однократное* действие, то тепловая машина работает *периодически*, т.е. по замкнутому циклу. Это требует не только внимания к материалам и конструктивно-технологическим особенностям машин, но и теоретического осмысления в части термодинамики процессов. В частности, формула (4.38) указывает на невозможность создания *вечного двигателя первого рода*, который мог бы работать, не занимая теплоту δQ извне. Идеи такого двигателя восходят еще к XII в. (индий-

ский проект с перетеканием ртути), но только через шесть веков (!) Парижская академия наук на основании первого закона термодинамики постановила прекратить рассмотрение подобных идей.

Вещество **рабочего тела** реальных двигателей — это чаще всего газ или пар, которые легко переводить из одного состояния в другое путем расширения и сжатия (двигатели внутреннего сгорания, паровые турбины и т.д.).

Если замкнутый цикл осуществлять по траектории 23532 (см. рис. 4.7), то работа в процессе 532 та же, что и в процессе 235, но с обратным знаком. Следовательно, работа за цикл равна нулю, и подобная машина никому не нужна. Чтобы получить $A > 0$, возвратный процесс на pV -диаграмме должен идти ниже, чем прямой, для чего требуется $T_2 < T_1$. Этого достигают путем теплообмена: в прямом процессе газ (пар) получает от нагревателя с температурой T_1 теплоту Q_1 и расширяется, совершая работу (см. рис. 4.7), затем его сжимают, возвращая в исходное состояние, а теплоту Q_2 он отдает холодильнику с температурой $T_2 < T_1$ (рис. 4.8). Поскольку за цикл $\Delta U = 0$, то формула (4.38) принимает вид

$$A = \Delta Q = Q_1 - Q_2. \quad (4.40)$$

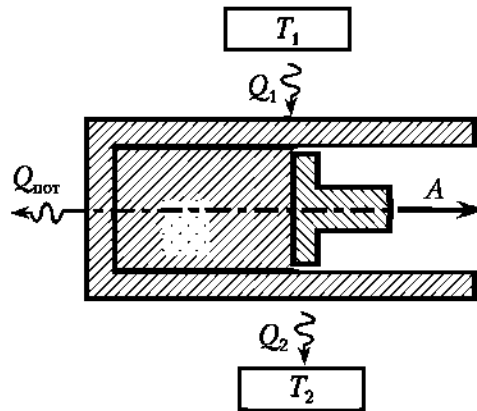


Рис. 4.8

Из формулы (4.40) следует весьма важный вывод: тепловая машина не может преобразовать в механическую энергию *всю* полученную ею теплоту Q_1 — часть Q_2 она обязана вернуть. Это отражает **второй закон (начало) термодинамики**, сформулированный английским физиком У. Томсоном (Кельвином) (1824—1907), а также Р. Клаузиусом и М. Планком (1858—1947): *невозможен цикл, в результате которого сообщенная системе теплота полностью превращается в механическую работу.*

В противном случае можно было бы тысячи лет превращать в механическую энергию, например, теплоту Мирового океана, и такая машина стала бы *вечным двигателем второго рода*. Его существование вполне допускается первым законом термодинамики, но оно противоречит второму.

Наиболее разумной «машиной» природы является сам человек (конструирующий другие машины). Например, энергетические затраты на поддержание его памяти кровоснабжением оптимизируются в зависимости от ее использования. Если к каким-то нейронным кластерам памяти человек обращается редко, то она рассеивается. И все же, несмотря на разумность устройства такой «машины», часть потребляемой ею энергии выделяется вовне.

Выделяет ее и любая военная машина — она не может превращать в полезную работу *всю* потребляемую извне энергию. Поэтому тепловой фон работающих машин всегда создает контраст с окружающей средой. На этом основано непрекращающееся соревнование между маскировкой и демаскировкой (см. параграф 9.1). Кроме того, поскольку $Q_2 \neq 0$, ни одна машина не может иметь КПД, равный 1:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (4.41)$$

Другой вопрос — как сделать его *максимально возможным*. Он сводится к тому, из каких именно процессов следует формировать цикл машины. Рассмотрим сначала идеализированные изопроцессы.

4.7. Изопроцессы и цикл Карно

При **изохорном** процессе 12 (см. рис. 4.7) $dV = 0$, и из формул (4.36), (4.38) следует равенство

$$\delta Q = dU = \nu c_V dT, \quad (4.42)$$

где использовано соотношение (4.39), а индекс указывает, что нагревание осуществляется *при постоянном объеме*. Поэтому c_V называют **молярной теплоемкостью при постоянном объеме**:

$$c_V = \frac{i}{2} R, \quad (4.43)$$

где использовано соотношение (4.35). У молекулы H_2 , например, $i = 5$ и, следовательно, $c_V = 5R/2$.

При **изобарном** расширении 23 (см. рис. 4.7)

$$\delta Q = \nu c_p dT, \quad (4.44)$$

где c_p — молярная теплоемкость при постоянном давлении. Здесь *теплота расходуется не только на увеличение внутренней энергии газа, но и на совершение работы*. Поэтому при том же $\delta Q dT$ меньше, т.е. $c_p > c_V$. Если все члены уравнения (4.38) выразить через температуру, подставив соотношения (4.35), (4.44) и формулу (4.36), в которой правую часть выразим из уравнения состояния в виде $\nu R dT$, то получим **уравнение Майера**

$$c_p = c_V + R. \quad (4.45)$$

При **изотермическом** процессе 34 (см. рис. 4.7) внутренняя энергия не изменяется по определению, следовательно, *вся поступающая теплота идет только на совершение работы*:

$$Q = A = \int_{V_3}^{V_4} p dV = \nu RT \int_{V_3}^{V_4} \frac{dV}{V} = \nu RT \ln \frac{V_4}{V_3}. \quad (4.46)$$

Подставляя соотношения (4.35) и (4.36) в формулу (4.38), найдем для одного моля:

$$\delta Q = c_V dT + p dV. \quad (4.47)$$

Разделив обе части равенства на T и пользуясь выражением (4.1), получим

$$\frac{\delta Q}{T} = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dV}{V} = d(c_v \ln T + R \ln V), \quad (4.48)$$

где $\frac{dT}{T} = d \ln T$ и $\frac{dV}{V} = d \ln V$. Так как правая часть формулы (4.48) — это полный дифференциал, то и левая также. В соответствии с комментариями к формуле (4.38) по поводу символа d это означает, что существует функция состояния, дифференциал которой равен левой части (4.48). Ее обозначают S и называют энтропией:

$$dS = \frac{\delta Q}{T}. \quad (4.49)$$

Понятие энтропии (от греч. *en* — внутрь и *tropé* — превращение) ввел Р. Клаузиус.

Из сопоставления формул (4.39) и (4.49) следует, что энтропия имеет ту же размерность Дж/К, что и теплоемкость. Поскольку S — функция состояния, то возможен такой *изопроцесс*, при котором она остается постоянной. По аналогии с другими его можно назвать *изэнтропным*, однако чаще называют **адиабатным**.

ВОПРОС. Как выглядит первый закон термодинамики при адиабатном процессе?

ОТВЕТ. Как ясно из формулы (4.49), при $S = \text{const}$ $\delta Q = 0$, т.е. он протекает без теплообмена с окружающей средой. Тогда из формулы (4.38) следует

$$\delta A = -\Delta U. \quad (4.50)$$

Такой процесс можно осуществить в термосе, создающем тепловую изоляцию, однако чаще его реализуют при быстрых изменениях объема, когда время процесса много меньше времени релаксации при теплообмене — теплота просто не успевает передаваться. Так происходит при нагревании работающего насоса или компрессора, сжатии рабочей смеси в цилиндре дизельного двигателя, охлаждении открытого баллона со сжатым воздухом, огненного шара при ядерном взрыве и т.д.

Зависимость одного из параметров состояния от другого при адиабатном процессе называется **адиабатой**. На pV -диаграмме (см. рис. 4.7) адиабата 35 спадает круче изотермы, так как расширение происходит только за счет внутренней энергии газа и потому его температура ниже. Выражение для адиабаты можно получить из формулы (4.38):

$$c_v \ln T + R \ln V = \text{const}, \text{ т.е. } \ln TV^{\chi-1} = \text{const},$$

где χ — показатель адиабаты (его измеряют в лабораторном практикуме):

$$\chi = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_v + R}{c_v} = 1 + \frac{2}{i}. \quad (4.51)$$

Таким образом, варианты уравнения адиабаты

$$TV^{\chi-1} = \text{const}, \quad pV^{\chi} = \text{const}, \quad pT^{1-\frac{\chi}{i}} = \text{const}, \quad (4.52)$$

где два последних выражения получены с помощью формулы (4.1).

Какой же цикл из рассмотренных процессов следует формировать в тепловой машине? В поиск ответа на этот вопрос значительный вклад внес французский инженер С. Карно (1796—1832), отдавший дань бурным временам Французской революции. Он показал, что полезную работу можно получить только в том случае, когда теплота переходит от более нагретого тела к более холодному, причем какое именно рабочее тело служит носителем теплоты, значения не имеет. Идеальный цикл можно сформировать в машине, работающей с двумя термостатами — нагревателем и холодильником. Поскольку температура термостатов постоянна по определению, теплообмен с ними должен быть *изотермическим*. А чтобы осуществлять переходы между изотермическими процессами без потерь теплоты, они могут быть только *адиабатными* (рис. 4.9). Из формул (4.41) и (4.46) получаем КПД цикла Карно:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 \ln(V_2/V_1) - T_2 \ln(V_3/V_4)}{T_1 \ln(V_2/V_1)}. \quad (4.53)$$

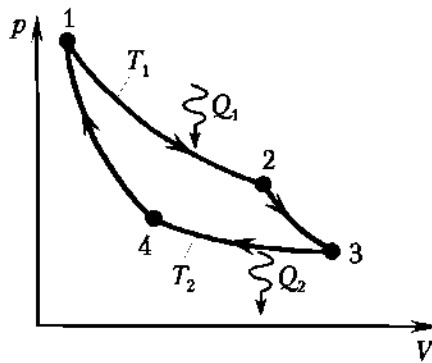


Рис. 4.9

Поскольку V_2 и V_3 относятся к одной адиабате, а V_4 и V_1 — к другой, воспользуемся формулой (4.52): $T_2/T_1 = (V_2/V_3)^{\gamma-1} = (V_1/V_4)^{\gamma-1}$, откуда $V_2/V_1 = V_3/V_4$. Подставляя это выражение в формулу (4.53), получим

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (4.54)$$

Как следует из формулы (4.54), $\eta = 1$ достижимо лишь при $T_2 = 0$. Определенная относительно этого **абсолютного нуля** температурная шкала называется **термодинамической шкалой Кельвина**. Она совпадает с идеальнo-газовой шкалой. Помимо $T = 0$, за опорную точку измерения температуры принимают и $T = 273,16$ К — «тройную точку воды», при которой вода, лед и водяной пар находятся в равновесии. Она определяет шкалу Цельсия.

Формула (4.54) справедлива для рабочего тела не только в виде идеального газа.

4.8. Второй закон термодинамики и реальные машины

В реальных процессах неизбежно *дополнительное* увеличение потерь Q_2 вследствие трения поршней о стенки цилиндров, теплообмена со средой и т.д. Поэтому у *любой реальной машины* КПД ниже идеального значения (4.54):

$$1 - \frac{Q_2}{Q_1} \leq 1 - \frac{T_2}{T_1}, \quad (4.55)$$

где знак равенства сохранен для идеального цикла.

ВОПРОС. Какой путь повышения КПД реальных машин следует из формулы (4.55)?

ОТВЕТ. Увеличение T_1 и уменьшение T_2 . Последняя определяется, как правило, атмосферой, температура которой вблизи машины повышается ее выхлопом до -100°C . Что касается T_1 , то для ее повышения используют, в частности, теплоизоляцию, например керамический корпус (так называемые адиабатные двигатели). В любом случае $T_1 > T_2$ на $\sim 300\text{ K}$ и потому КПД тепловых машин $\sim 0,4-0,5$, а у тепловоза еще меньше ($\sim 0,1$).

Сопоставляя формулу (4.54) с соотношениями (4.41) и (4.49), получим $Q_1/T_1 = Q_2/T_2$, т.е.

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = \Delta S = 0. \quad (4.56)$$

На верхней изотерме $1 \rightarrow 2$ цикла Карно (см. рис. 4.9), где производится полезная работа,

$$\Delta S = \frac{Q_1}{T_1}, \quad (4.57)$$

что позволяет выявить один из смыслов энтропии. Из формул (4.57) и (4.54) следует: чем меньше T_1 , тем *меньше* КПД машины и *больше* приращение энтропии, т.е. *энтропия — это мера бесполезности теплоты как источника механической энергии*.

Ее физический смысл на микроуровне позволяет выявить нижняя изотерма $3 \rightarrow 4$ цикла Карно (см. рис. 4.9):

$$\Delta S = \frac{Q_2}{T_2} = Nk \ln \frac{V_3}{V_4}. \quad (4.58)$$

Последнее выражение получено с использованием формулы (4.46). Так как $Q_2 < 0$, то и $\Delta S < 0$, т.е. при изотермическом сжатии энтропия уменьшилась. Как это понимать? Что именно изменилось в состоянии системы? Число молекул и их средняя энергия остались прежними ($T = \text{const}$), изменился лишь объем газа: $V_4 < V_3$, т.е. молекулы имеют возможность занимать в пространстве *меньшее число положений*. Каждая комбинация положений (вместе с импульсами) характеризует *микросостояние системы*, а совокупность комбинаций — *макросостояние*, или *статистический вес* (см. параграф 4.2).

Вернемся к исходному объему V_3 и теперь уже *мысленно* вычленим внутри него объем V_4 . Вероятность того, что какая-либо молекула займет положение в пределах V_4 : $\omega_1 = V_4/V_3$, а вероятность того, что *все* N молекул *одновременно* окажутся в объеме V_4 , равна произведению таких вероятностей (события независимые). Это произведение определяет *статистический вес* Ω такого состояния системы: $\Omega = (V_4/V_3)^N$. Логарифмируя это выражение и подставляя в формулу (4.58), получим

$$S = k \ln \Omega. \quad (4.59)$$

Эту важную формулу получил Л. Больцман в 1872 г. Из нее следует, что *энтропия пропорциональна статистическому весу системы, характеризующему вероятность ее состояния*.

Например, на рис. 4.1 статистический вес состояния, при котором все четыре молекулы находятся в одной половине сосуда, мал — мала и энтропия. Наиболее вероятно *равномерное* распределение молекул по объему, тогда и энтропия максимальна.

Энтропия является мерой хаотичности системы.

Если теплота передается от более нагретого тела к менее нагретому, то, поскольку знаменатель в формуле (4.58) уменьшается, такой процесс возможен, а обратный — нет: *теплота не может самопроизвольно передаваться от менее нагретого тела к более нагретому.*

Это является еще одной формулировкой второго закона термодинамики. Она указывает и на необратимый ход времени: *самопроизвольные процессы протекают в направлении роста энтропии* (существуют, правда, и обратные процессы — см. параграф 12.4).

Рассмотренные термодинамические характеристики процессов и выражение (4.55) позволяют конструировать всевозможные машины. Среди них есть и *холодильные*, осуществляющие цикл в обратном направлении: они отбирают теплоту у тела с меньшей температурой и отдают ее телу с большей температурой. Однако большее распространение имеют тепловые машины, к которым относится и автоматическое огнестрельное оружие.

Исторический экскурс

Все более высокие требования, предъявляемые к огнестрельному оружию, вступили в противоречие с ограниченными возможностями стрелка: человек не в состоянии производить вручную серию выстрелов с малыми интервалами и нужной точностью. Поэтому в конце XIX — начале XX в. появились первые автоматические винтовки («Браунинг» и др.), но настоящее развитие они получили во время Второй мировой войны. Это означает, что огнестрельное оружие также пришло к замкнутым циклам.

В автоматическом стрелковом оружии замкнутый цикл осуществляется за счет части энергии пороховых газов. Она воздействует на своеобразный пружинный маятник, аналогичный механической части ДВС, которая управляет клапанами цилиндров, газораспределением и искрообразованием. Соответственно, и процессы в этих двух машинах похожи.

Примеры практики

Сопоставим циклы карбюраторного ДВС и боевого патрона (рис. 4.10). В обеих машинах исходным материалом для рабочего тела является смесь топлива с кислородом. В ДВС газообразная топливная смесь формируется карбюратором и всасывается в цилиндр двигателя через клапан, а патрон содержит ее в готовом виде (твердый порох). Превращение топливной смеси в рабочее тело осу-

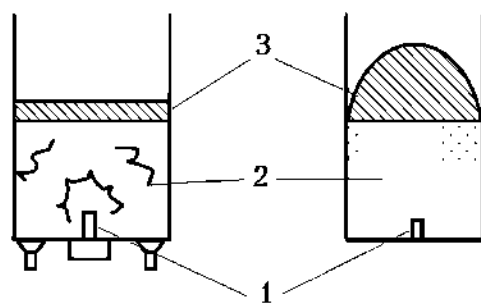


Рис. 4.10

пествляется элементами 1 инициации ее поджига — свечой зажигания или капсюлем.

В обеих машинах рабочее тело 2 приводит в движение основные подвижные компоненты 3 систем, совершающие работу, — поршень в цилиндре или пулю (снаряд) в стволе оружия. В обеих машинах параметры рабочего тела рассчитаны в соответствии с массами подвижных тел, конструктивными особенностям машин и ожидаемыми на выходе тактико-техническими характеристиками. Поэтому комплексные требования к машинам не допускают отклонений — как в части характеристик рабочего тела, так и в отношении конструкции. Зачастую эти требования взаимоувязаны. Например, истирание поршневых колец ДВС приводит к падению рабочего давления в цилиндре. То же происходит при вздутии ствола оружия или его просверливании, что делают при намеренном выведении огнестрельного оружия из строя.

У ДВС и огнестрельного оружия различны температуры, давления, объемы рабочего тела (газов) и время осуществления цикла. Выстрел происходит гораздо быстрее (0,001–0,06 с), чем цикл ДВС, и в этом отношении он подобен неуправляемому взрыву. По-разному выводятся отработавшие газы и играют разные роли. И тем не менее с позиций термодинамики принципиальной разницы между этими устройствами нет — оба работают по сходным термодинамическим циклам (рис. 4.11). На рис. 4.11, а представлен цикл ДВС, где V_c — объем камеры сжатия, V_h — рабочий объем и L — площадь, равная полезной работе.

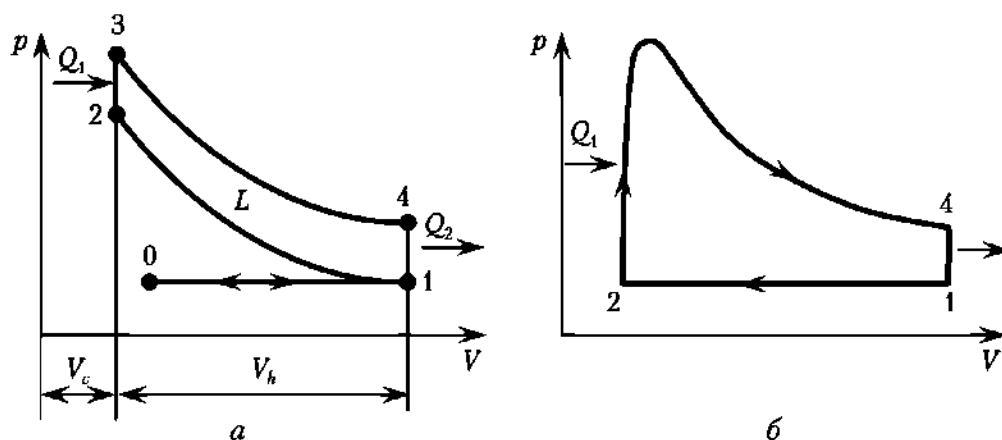


Рис. 4.11

Цикл карбюраторного ДВС, в котором сгорание топлива происходит при постоянном объеме, примерно соответствует так называемому циклу Отто, который начинается со всасывания топливной смеси при движении поршня от верхней мертвой точки к нижней (изобара 0–1). Далее, по адиабате 1–2, образованной движением поршня от нижней мертвой точки к верхней, происходит ее сжатие, а в точке 2 смесь воспламеняется, в результате чего температура и давление продуктов сгорания резко возрастают по изохоре 2–3. По адиабате 3–4 (рабочий ход) происходит расширение рабочего тела вплоть до точки 4, где выпускной клапан открывается, и за счет отвода теплоты Q_2 давление и температура газа в цилиндре изохорно уменьшаются до наружных значений. Дальнейшее движение поршня (вызванное инерцией вращающегося маховика) приводит к удалению продуктов сгорания из цилиндра через выпускной клапан (изобара выхлопа 1–0).

Базовый начальный прием при построении физических моделей — это идеализация. Поэтому и в термодинамической модели двигателя рабочее тело идеализируют. Его считают идеальным газом, подвод теплоты Q_1 к которому производится не за счет экзотермической реакции горения (окисления) смеси, а от внешнего нагревателя.

Термодинамический цикл огнестрельного оружия схематично показан на рис. 4.11, б. Готовая смесь (пироксилиновый порох) подается в рабочую зону в составе патрона в подготовительном процессе 1–2, аналогичном процессу 0–1 на рис. 4.11, а. В точке 2 происходит поджиг пороха и его превращение в пороховые газы, что на языке термодинамической модели означает поступление к рабочему телу теплоты Q_1 . Оно вызывает изохорное повышение 2–3 его давления. В адиабатном такте 3–4 пуля (снаряд) разгоняется, что вызвано возрастанием объема рабочего тела. Оно, в свою очередь, влечет уменьшение плотности и температуры пороховых газов. Приток новых газов от сгорающего заряда не успевает это падение компенсировать, и потому давление рабочего тела в стволе уменьшается.

После вылета снаряда из ствола давление газов падает по изохоре 4–1, однако, в отличие от ДВС, у стрелкового оружия существует еще и последствие пороховых газов. Направленно истекая из канала ствола, они как бы удлиняют его собою и продолжают разгонять пулю. Поэтому пуля (снаряд) достигает максимальной скорости не у дульного среза ствола, а на удалении от него на несколько десятков сантиметров. Описанное последствие заканчивается, когда давление пороховых газов на дно пули уравнивается сопротивлением воздуха. В такте 1–2 происходит возврат машины в начальное состояние, цикл завершается: затвор с новым патроном занимает исходную позицию.

Работа (и КПД) термодинамического цикла, отображенного на pV -диаграмме, определяется площадью, ограниченной его тактами 1–2–3–4–1. Полезная работа определяется также продолжительностью рабочего такта, которая зависит от длины ствола. Чем он длиннее, тем дольше на пулю действует сила давления газов и больше совершаемая работа, которая преобразуется в кинетическую энергию пули. Соответственно, больше ее начальная скорость, прицельная дальность стрельбы и пробивная сила. В этом отношении снайперская винтовка превосходит карабин, автомат и тем более пистолет. Однако удлинение ствола имеет предел: по мере удаления пули (снаряда) от затвора сила давления газов может оказаться меньше силы трения. Повышение давления газов возможно путем увеличения мощности заряда, однако и здесь существует предел, связанный со скоростью воспламенения пороха. Поскольку она ниже скорости распространения ударной волны в стволе, то при слишком большом заряде пуля (снаряд) может вылететь из ствола еще до полного сгорания пороха, т.е. эффективной оказывается лишь часть заряда. Здесь напрашивается аналогия с ядерным зарядом атомной бомбы, увеличение которого выше некоторого предела не приводит к увеличению мощности взрыва.

На КПД оружия влияет и теплоотвод от ствола, от которого зависит давление пороховых газов, а теплоотвод зависит от перепада температуры между стволом и атмосферой (см. параграф 4.4).

Самым длинноствольным орудием в военной истории была немецкая пушка «Колоссаль» калибром 210 мм, которая в Первую мировую войну обстреливала Париж на расстоянии 110 км (позже выяснилось, что на таких дистанциях эффективнее применять авиабомбы и ракеты). Весьма крупным орудием была также немецкая железнодорожная пушка «Дора» калибром 800 мм, примененная при штурме Севастополя в 1942 г. и подавлении Варшавского восстания в 1944 г.

Сопоставляя термодинамические циклы ДВС и огнестрельного оружия, приходим к выводу, что основная разница между ними состоит главным образом в их технических характеристиках. Если температура пороховых газов в канале ствола $(2\div 3) \cdot 10^3$ °С примерно та же, что и в цилиндре ДВС (карбюраторного — 2400°С, дизельного — 2000°С), то давление отличается существенно: в камере сгорания карбюраторного двигателя — $5 \cdot 10^5$ Па, дизельного — 107 Па, а в канале ствола — $(3\div 4) \cdot 10^8$ Па. В сочетании с высокой скоростью выстрела эта разница определяет

и соотношение мощностей: в ДВС — $\sim 10^2 - 10^3$ кВт, а, например, у 76-миллиметровой пушки — $\sim 2 \cdot 10^5$ кВт.

Что касается распределения энергии пороховых газов, то оно варьирует в зависимости от типа оружия, заряда и снаряда. Примерные соотношения здесь таковы: 20–40% — кинетическая энергия снаряда (из них $\sim 0,6\%$ — энергия вращательного движения); 15–25% — тепловые потери; 3–5% — энергия отката; остальное — рассеяние в атмосферу.

4.9. Агрегатные состояния вещества

Поведение вещества в природе, как и в рукотворных технологиях и машинах, зависит от его агрегатного состояния, которое определяется средним расстоянием между атомами. От него зависит конкуренция тепловой энергии их движения и потенциальной энергии E_n их электростатического взаимодействия (рис. 4.12).

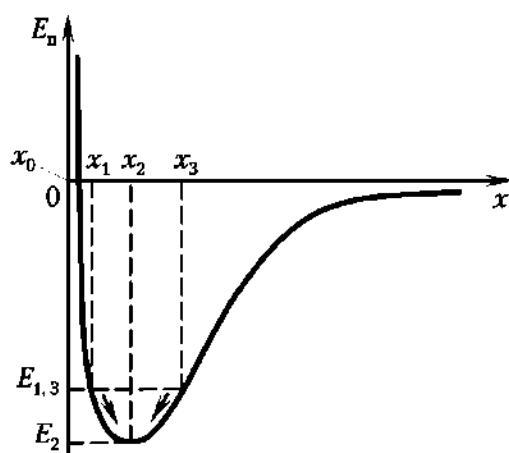


Рис. 4.12

Поскольку электростатическое поле (как и поле тяготения) является консервативным (см. параграфы 2.2, 5.3), работа консервативной силы $F_l dl$ равна убыли потенциальной энергии:

$$F_l = -\frac{dE_n}{dl}. \quad (4.60)$$

Отсюда если $dE_n/dl < 0$, то $F_l > 0$, т.е. сила направлена в сторону перемещения. Если же $dE_n/dl > 0$, то $F_l < 0$, т.е. сила направлена в сторону, противоположную перемещению. Применительно к рис. 4.12 эти соотношения указывают, что атомы стремятся к положению $x = x_2$, при котором энергия взаимодействия минимальна, а $dE_n/dl = 0$, т.е. система находится в равновесии. Это одно из воплощений принципа минимума энергии.

Расстояние x_2 — порядка размера молекулы. При $x \gg x_2$, что характерно для газов, производная dE_n/dl так мала, что атомы практически не взаимодействуют. Именно поэтому газы легко расширять и сжимать. Значение $x \approx x_2$ характерно для жидкостей и твердых тел. При $x < x_2$ потенциальная кривая идет значительно круче, чем при $x > x_2$, т.е. силы (4.60) весьма велики. Поэтому жидкости и твердые тела сжимать трудно.

Когда вещество находится в жидком состоянии, молекулы теряют характерную для газов самостоятельность. Они объединены в группы, имеющие определенную упорядоченность. В то же время группы как целое отно-

нительно легко перемещаются друг относительно друга, что придает жидкому состоянию свойство **текучести**.

Отличительной особенностью **твердого** тела является жесткая связь между атомами, которая обуславливает его объем и твердость. Атомы чередуются геометрически правильно, периодически повторяя одну и ту же **кристаллическую структуру**. Она имеет вид **пространственной решетки**, в которой атомы образуют ее узлы. Возможные структуры могут быть кубическими, гексагональными, тетрагональными, триклинными и т.д. Вид кристаллической решетки определяется повторяющейся в кристалле **элементарной ячейкой**, переносом которой можно воспроизвести весь кристалл. Некоторые решетки реализуют максимально компактную упаковку атомов. Существуют и дефекты структуры (отклонения от упорядоченности), которые называют **дислокациями**.

Материал, состоящий из одной кристаллической решетки, называют **монокристаллом**. Он имеет правильную геометрическую форму, отражающую симметрию решетки. Примером может служить кварц горных пород. Однако чаще всего твердое тело представляет собой совокупность мелких кристаллов, соединенных друг с другом произвольным образом. Такая структура, которой отличаются, например, металлы, называется **поликристаллом**. Структуры твердого тела можно формировать и искусственно, выращивая монокристаллы из насыщенного раствора или расплава.

В **конденсированном** состоянии вещества (жидком или твердом) объем при нагревании изменяется мало, и потому $c_p \approx c_v$. Некоторое изменение объема определяется **коэффициентом теплового расширения α** . В соответствии с законом Гей-Люссака

$$\alpha = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT}. \quad (4.61)$$

У большинства веществ, как и у газов, $\alpha > 0$, однако существуют исключения. Например, у воды в интервале $0-4^\circ\text{C}$ объем при нагревании уменьшается. Вообще, у жидкостей $\alpha \sim 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, а у твердых тел еще на порядок меньше. Несмотря на это, тепловое расширение может создавать серьезные проблемы в машинах, приборах и строительных конструкциях. Поэтому его учитывают, например, формируя тепловые зазоры.

Тепловые колебания атомов, находящихся на низких энергетических уровнях, симметричны относительно равновесного расстояния x_2 (см. рис. 4.12). С повышением температуры из-за асимметрии кривой они становятся ангармоническими, и среднее положение между атомами возрастет, связи между ними ослабевают, а затем и разрываются. Это пример того, как количество (энергия атомов) переходит в качество (иное агрегатное состояние вещества). Температуры, при которых вещество переходит из одной фазы в другую (рис. 4.13, *a*), называют **температурами фазового перехода** (превращения). К ним относятся температуры (точки) плавления и затвердевания; парообразования и конденсации; сублимации (возгонки). **Фазовые переходы первого рода** характерны тем, что температура вещества в процессе перехода остается постоянной, но изменяется его объем.

Чтобы вызвать переход из конденсированной фазы в фазу меньшей плотности, нужно сообщить веществу энергию (теплоту), которая соответствует потенциальной энергии сцепления молекул. Поскольку она способ-

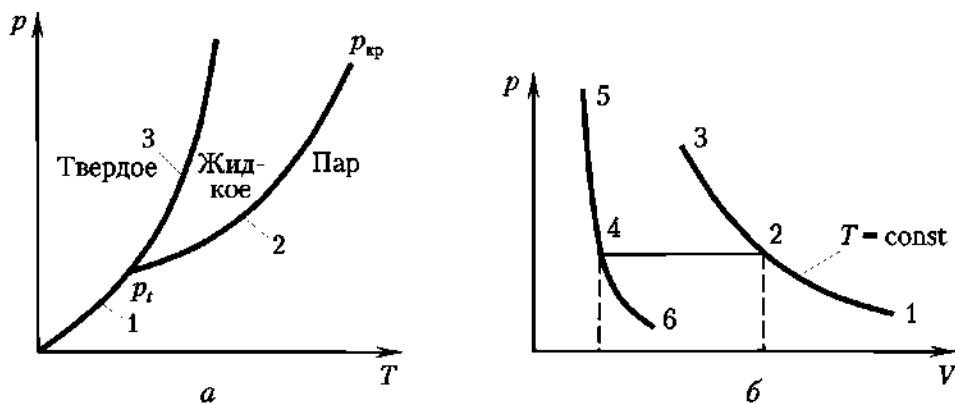


Рис. 4.13

ствует разрыву связей, не приводя к повышению температуры, ее называют **скрытой теплотой превращения**. При плавлении она приводит к разрушению кристаллической решетки, при парообразовании — к отдалению молекул жидкости друг от друга и т.д. Поскольку объем, занимаемый веществом, и степень хаотичности поведения молекул при таком переходе возрастают, то увеличивается и энтропия системы. При переходах в обратном направлении система выделяет такую же скрытую теплоту превращения, а ее энтропия уменьшается.

Существуют и такие сочтения параметров состояния системы, при которых между разными фазами вещества устанавливается равновесие. На рис. 4.13, б изотерма пара 1–2 переходит в точке 2 в горизонтальную линию на участке 2–4, который соответствует равновесию пара и жидкости. При этом полный объем системы из двух фаз может быть разным. Пар здесь является насыщенным, а его давление p_s зависит от температуры. В точке 4 весь пар переходит в жидкость. В отсутствие центров кипения можно получить и перегретую жидкость (участок 4–6). При обратном процессе точка 2 соответствует конденсации пара. Она начинается на центрах конденсации, например на инородных включениях, а при их отсутствии возникает пересыщенный пар (участок 2–3).

Таким же образом равновесие «твердое тело — жидкость» описывается *кривой плавления*, а равновесие «твердое тело — газ» — *кривой возгонки*. Эти кривые соединяются в одной точке p_v , где все три фазы находятся в равновесии (см. рис. 4.13. а), как например, в тройной точке воды ($T = 273,16$ К).

В последние годы большое внимание уделяется возможности получения новых форм вещества с необычными свойствами, например композитных материалов, жидких кристаллов (см. параграф 8.8) или систем, формируемых атомами углерода. В 1985 г. были открыты **фуллерены** — атомарные выпуклые замкнутые многогранники, близкие к сферической конструкции, в которых каждый атом углерода находится в углу одного пятиугольника и двух шестиугольников. С тех пор из них создают всевозможные изделия (нанотрубки, полупроводниковые приборы, проволоку, медицинские препараты), которые становятся все более перспективными. Из атомов углерода можно сформировать и двумерный кристаллический (гексагональный) монослой, называемый **графеном**, обладающий высокой твердостью, тепло- и электропроводностью. За многообещающие эксперименты с этим материалом выходцы из России А. К. Гейм и К. С. Новоселов были в 2010 г. удостоены Нобелевской премии.

Резюме

Подводя итоги настоящей главы, отметим ее основные положения.

Для анализа состояния вещества динамические закономерности механики непригодны — требуются статистические методы, на которые опирается молекулярно-кинетическая теория (МКТ). Ее результаты адекватны реальному поведению систем, в том числе явлениям переноса, и выявляют смысл температуры как меры средней энергии хаотического движения молекул, определяющего тепловую энергию вещества.

В отличие от МКТ, термодинамический метод опирается на энергетические соотношения, подчиняющиеся закону сохранения энергии. Первый и второй законы термодинамики определяют соотношения и направленность тепловых процессов и лежат в основе действия многих машин, в том числе относящихся к ВВТ.

Вопросы для самоконтроля

1. На основании формулы (4.20) ответьте: зависит ли наличие атмосферы от размера планеты и меняется ли ее состав с ростом высоты?
2. Чему равны теплоемкости при изотермическом и адиабатном процессах?
3. Почему высоко в горах трудно сварить яйца?
4. Почему в центре курортного города более жарко, чем на набережной?
5. Когда работа танкового двигателя эффективнее — зимой или летом?
6. Почему автомобиль быстрее останавливается, если тормозить, не отключая двигатель? На какой передаче торможение двигателем эффективнее — высокой или низкой?
7. Почему действующий огнетушитель покрывается инеем?
8. Почему медицинские банки втягивают кожу?
9. Как зависит КПД карабина от заряда патрона, если он полностью сгорает до вылета пули? (Объясните ответ, пользуясь рис. 4.10, б.)
10. Когда тяга из печных труб зимой больше — зимой или летом? Где больше вязкое трение при движении автомобиля, где быстрее рассеиваются отработавшие газы и остывает двигатель — в низине или в горах?

Задачи с решениями

4.1. Немецкий физик О. Штерн поставил эксперимент для проверки максвелловского распределения молекул газа по скоростям (рис. 4.14).

При нагревании нити C , расположенной по оси коаксиальных цилиндров и покрытой серебром, испаряющиеся атомы серебра образуют газ и свободно движутся в вакууме. Часть их вылетает в щель цилиндра A , по траектории D достигает цилиндра

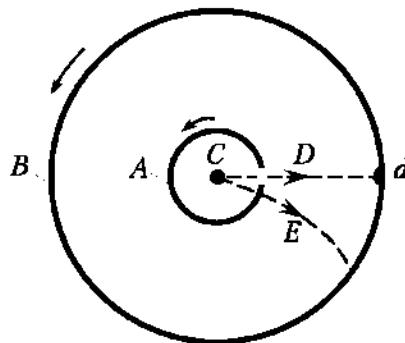


Рис. 4.14

дра B и оседает на нем слоем d . Приведем цилиндры во вращение с одинаковой угловой скоростью ω . Как по следу атомов на цилиндре B определить их скорость v в радиальном направлении?

Решение. За время движения атомов от щели к цилиндру B тот успевает повернуться на некоторый угол. Смещение l полоски серебра определяется временем t движения атомов между цилиндрами и линейной скоростью u поверхности внешнего цилиндра:

$$l = ut = \omega R_2 t, \quad t = \frac{R_2 - R_1}{v},$$

где v — скорость атомов серебра. Из этих равенств получаем

$$v = \frac{\omega R_2 (R_2 - R_1)}{l}.$$

Примечание. При вращающихся цилиндрах полоска серебра оказалась более размытой, чем при неподвижных. Следовательно, как и предсказывал Максвелл, атомы серебра имеют *разные* скорости. Чем больше молекул имеет данную скорость, тем плотнее осадок серебра в данном месте полоски. Оптическое исследование плотности слоя показало, что по ширине полоски она изменяется в соответствии с распределением Максвелла.

4.2. При взлете истребителя барометр на борту показывал давление $1,01 \cdot 10^5$ Па, а в полете — $0,8 \cdot 10^5$ Па. Температура за бортом в обоих случаях 7°C . Какова высота полета? Молярная масса воздуха 29 г/моль.

Дано: $p = 1,01 \cdot 10^5$ Па; $p = 0,8 \cdot 10^5$ Па; $t = 7^\circ\text{C} = 280$ К; $M = 29$ г/моль = $29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

$h = ?$

Решение. В соответствии с барометрической формулой

$$p = p_0 e^{-\frac{mgh}{kT}}.$$

Отсюда

$$\ln\left(\frac{p_0}{p}\right) = \frac{mgh}{kT}, \quad h = \frac{kT}{mg} \ln\left(\frac{p_0}{p}\right).$$

Подставляя данные, получим $h \approx 1900$ м.

4.3. Какова установившаяся скорость падения парашютиста массой 80 кг при росте $1,7$ м и ширине грудной клетки $0,4$ м, если при затяжном прыжке тело горизонтально, а руки разведены в стороны?

Дано: $l = 1,7$ м; $b = 0,4$ м.

$u = ?$

Решение. Установившуюся скорость можно определить в соответствии с формулами (4.33), (4.34) и табл. 4.1, откуда следует $c = 0,3$. Положим миделево сечение $S = lb = 0,7$ м². С учетом раскинутых рук сечение считают иногда квадратным: $S = l^2 \approx 2,9$ м². Принимая среднее из этих значений $S = 1,8$ м² и подставив данные в формулу (4.34), получим $u \approx 49$ м/с (≈ 180 км/ч).

Примечание. В зависимости от высоты и состояния атмосферы скорость падения составляет 50 – 150 м/с, но может быть и много выше. Так, австрийский парашютист Ф. Баумгартнер, прыгнув в специальном скафандре головой вниз с высоты ~ 39 км (!), достиг скорости 1343 км/ч, в то время как скорость звука при 0°C составляет 1193 км/ч!

4.4. Воздушный шар, наполненный гелием массой 2 г при температуре окружающей среды 27°C, в процессе подъема увеличился в объеме на 10%. Какую работу совершил гелий?

Дано: $m = 2 \text{ г} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$; $M = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$; $t = 27^\circ\text{C} = 300 \text{ К}$; $V_2 = 1,1 V_1$.

$A = ?$

Решение. Поскольку процесс изотермический,

$$A = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

В данном случае $A = \left(\frac{m_{\text{He}}}{M_{\text{He}}} \right) RT \ln 1,1$.

Подставляя данные, получим $A \approx 119 \text{ Дж}$.

4.5. В одном из советских орудий времен Второй мировой войны масса снаряда — 25 кг; его скорость при вылете из дульного среза — 800 м/с; масса пороховых газов (равная массе заряда) — 3,8 кг; теплотворная способность пороха (верхняя граница) — $Q = 10 \text{ МДж/кг}$. Определим КПД орудия.

Дано: $m_{\text{св}} = 25 \text{ кг}$; $v_0 = 800 \text{ м/с}$; $m_r = 3,8 \text{ кг}$; $\lambda = 10 \text{ МДж/кг}$.

КПД — ?

Решение. Полагая полезной энергией $E_{\text{пол}}$ дульную энергию снаряда, а затраченной $E_{\text{затр}}$ — энергию, выделившуюся при сгорании заряда, получим

$$\eta = \frac{E_{\text{пол}}}{E_{\text{затр}}} = \frac{0,5 m_{\text{св}} v^2}{m_r \lambda}.$$

Подставляя данные, получим $\eta = 0,21$.

Примечание. Полученный результат сопоставим с КПД авиационных двигателей.

Задачи для самостоятельного решения

4.6. В такте выпуска из цилиндра двигателя в атмосферу выбрасывается 0,6 г отработавших газов, содержащих по массе 1,8% оксида углерода. Сколько молекул CO поступает в атмосферу за 1 с работы четырехтактного восьмицилиндрового двигателя при частоте вращения коленчатого вала 1800 мин⁻¹? (*Примечание.* Частота рабочих циклов двигателя вдвое меньше частоты вращения коленчатого вала.)

4.7. В баллоне объемом 20 л пневматической тормозной системы автомобиля давление воздуха $8 \cdot 10^5 \text{ Па}$ при температуре 20°C. При срабатывании предохранительного клапана давление быстро уменьшается до $7,8 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Какой объем в баллоне занимал вышедший из него воздух? Какова температура оставшегося в баллоне газа? (*Примечание.* Молекулу воздуха считать двухатомной с жесткой связью между атомами.)

4.8. Пузырек воздуха, выдыхаемого аквалангистом, на поверхности водоема увеличился в объеме в полтора раза. Атмосферное давление $1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$. На какой глубине находится аквалангист? Температуру считать постоянной.

4.9. На одинаковых парашютах сбросили одинаковые по форме и размеру грузы с массами 100 кг и 50 кг. Первый падает с установившейся скоростью 6 м/с. С какой скоростью падает второй груз, если сила сопротивления воздуха пропорциональна квадрату скорости?

4.10. В камере автомобильной шины объемом 20 л при использовании домкрата давление воздуха $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$. После снятия автомобиля с домкрата в результате деформации камеры ее объем уменьшился на 0,5 л. Какова работа по сжатию воздуха?

Раздел II

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА



Глава 5

ЭЛЕКТРОСТАТИКА И ПОСТОЯННЫЙ ТОК

*Искусство — это тайный способ
извлечения тайной части правды.*

В результате изучения данной главы учащийся должен:

знать

- предмет, цели, основные понятия, модели, положения и законы электростатики и электродинамики, их эмпирические и теоретические основания;
- физическую сущность характеристик электростатического поля и описывающие его законы;
- принцип суперпозиции;
- теоремы для потока и циркуляции вектора \mathbf{E} ;
- возможности и особенности применения законов электростатики и электродинамики при исследовании объектов техники и вооружения;

уметь

- распознавать, вычленять и анализировать проявления закономерностей электростатики и электродинамики в изучаемых объектах природы и техники;
- формулировать изучаемую военно-техническую задачу с позиций законов электродинамики и применять аппарат теории для решения задачи;

владеть

- навыками применения законов электродинамики при решении военно-технических задач, сформулированных как физические;
 - навыками привлечения физических констант, справочных данных, оценки порядка величин и опоры на их размерности при решении задач электродинамики.
-

5.1. Электростатическое поле

В механике и молекулярной физике упоминалось электростатическое взаимодействие атомов, которое составляет часть электромагнитного взаимодействия. Оно относится к четырем фундаментальным взаимодействиям и лежит в основе многих физических, химических и биологических процессов, определяющих физическую картину мира (см. гл. 12).

Одна из идеальных моделей электромагнетизма, аналогичная модели материальной точки, — точечный заряд.

Точечным зарядом называют заряженное тело, размеры которого много меньше расстояния, на котором оно рассматривается.

Электростатические силы на много порядков больше гравитационных и определяются **законом Кулона**, который по форме похож на формулу (1.42):

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r^2}. \quad (5.1)$$

Формула (5.1) установлена Ш. Кулоном в 1785 г. с помощью крутильных весов (Г. Кавендиш получил ее раньше, в 1771 г., но не опубликовал). В этой формуле q, q' — модули точечных зарядов; r — расстояние между ними; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная ($1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \cdot 10^9$ м/Ф). Модули зарядов могут изменяться только *дискретно* (эту мысль высказал Фарадей) — на величину, не меньшую, чем **элементарный заряд** $e_0 = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Аналогия заряда с массой состоит еще и в том, что заряд q характеризует как *число* элементарных зарядов, так и *силу взаимодействия* между ними.

По историческим причинам знак заряда электрона определен как отрицательный, а протона — как положительный. Удобнее было бы наоборот, так как направление электрического тока (чаще всего создаваемого электронами), по предложению Ампера, определяется направлением движения *положительных* зарядов.

Формула (5.1) объясняет, почему макроскопические тела электрически нейтральны. Если в двух кусочках угля по 20 г баланс между положительными и отрицательными зарядами нарушить всего на $10^{-7}\%$, то на расстоянии 1 м между ними возникнет сила, бóльшая веса человека!

При любых преобразованиях заряд не изменяется. **Закон сохранения электрического заряда** установил американский физик и общественный деятель Б. Франклин (1706—1790).

Формула (5.1) (как и (1.42)) имеет фундаментальное значение для аппарата электростатики, однако ее непосредственное применение весьма ограничено — гораздо плодотворнее пользоваться понятием «поле». Оно увязывает кулоновскую силу с пространством, в котором она действует: *совокупность сил Кулона образует векторное электростатическое поле*.

Это не только удобно для расчетов формальное понятие, но и реально существующий *вид материи, который действует на электрические заряды*. Таким образом, понятия «электрический заряд» и «электрическое поле» органично связаны: заряд проявляет себя как в том, что создает поле, так и в том, что взаимодействует с ним. Электрический заряд можно даже рассматривать как некую особенность электрического поля.

Понятие «поле» ввел выдающийся английский физик М. Фарадей (1791—1867). По мнению А. Эйнштейна, идея поля была самой важной со времен И. Ньютона, у которого пространство выступало только как *пассивноеместилище* тел и зарядов.

Поле, существующее вокруг заряда q (рис. 5.1), *не зависит* от того, поместили в него другой заряд q' или нет, — q' можно рассматривать как *индикатор* поля, т.е. *пробный* заряд. Это позволяет представить формулу (5.1) в виде

$$\mathbf{F} = q'\mathbf{E}, \quad (5.2)$$

где \mathbf{E} — характеристика поля, *не зависящая* от наличия q' . Она называется **напряженностью электростатического поля** в данной его точке:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \boldsymbol{\tau}. \quad (5.3)$$

Здесь $\boldsymbol{\tau}$ — единичный вектор в направлении действия силы на положительный пробный заряд. Из формул (5.2), (5.3) следует, что *напряженность*

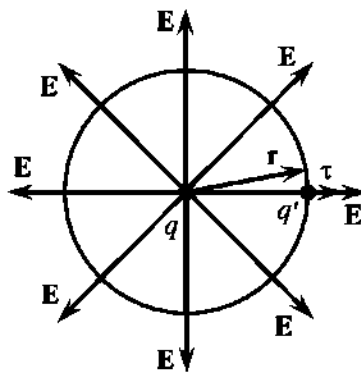


Рис. 5.1

электростатического поля — это сила, которая действует на единичный точечный положительный заряд, помещенный в данную его точку.

Таким образом, напряженность является **силовой характеристикой** поля.

Справедливость формулы (5.3) экспериментально подтверждена в огромном диапазоне расстояний: от 10^{-15} до 10^3 м. Из формулы (5.2) следует, что единицей напряженности является ньютон на кулон (Н/Кл), однако чаще применяют единицу **вольт на метр** (В/м), происхождение которой следует из дальнейшего (см. параграф 5.3).

Поскольку в поле точечного заряда вектор **E** направлен по радиусам, расходящимся от него как от *центра* (см. рис. 5.1), такое поле называют **центральной**.

Если вообразить сферы с общим центром, совпадающим с положением q , то число радиальных линий, пересекающих единицу площади каждой из них, пропорционально $1/r^2$. В соответствии с формулой (5.3) точно так же изменяется и модуль E . На этом основана идея **силовых линий** поля, которую ввел тот же М. Фарадей: их *густота*, т.е. число линий, приходящихся на единицу площади, характеризует *модуль* вектора **E**, а их *направление* (в данном случае — вдоль радиусов) — *направление* вектора **E**.

Электрическое поле чаще всего создается таким множеством точечных зарядов, что дискретность их положения неразличима, — заряд можно считать распределенным *непрерывно* и характеризовать *плотностью заряда*. Точно так же мы характеризуем плотностью массу вещества, полагая его сплошным, несмотря на то что оно состоит из разрозненных молекул. В зависимости от конфигурации тела и решаемых задач различают **поверхностную, объемную и линейную плотность заряда**:

$$\sigma = \frac{dq}{dS}; \quad \rho = \frac{dq}{dV}; \quad \tau = \frac{dq}{dl}. \quad (5.4)$$

Интегрируя эти выражения, можно найти полный заряд поверхности, объема или длины заданных размеров.

Поле каждого из зарядов не зависит от полей, созданных другими зарядами, а результирующая напряженность поля определяется их суммой:

$$\mathbf{E}_p = \sum_i \mathbf{E}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \tau_i. \quad (5.5)$$

Это математическое выражение **принципа суперпозиции** (наложения) электрических полей. Он позволяет пользоваться силовыми линиями вектора **E** для *любой* совокупности зарядов.

В однородном поле $\mathbf{E} = \text{const}$ по определению. Поэтому его силовые линии сонаправлены и имеют постоянную густоту. Такое поле образуют параллельные разноименно заряженные плоскости, размеры которых много больше расстояния между ними.

ВОПРОС. Могут ли силовые линии электростатического поля быть замкнутыми?

ОТВЕТ. Нет, поскольку они всегда начинаются на положительных, а заканчиваются на отрицательных зарядах.

5.2. Теорема Гаусса для электрического поля

Практическое использование формулы (5.5) ограничено системами, состоящими из нескольких зарядов. В остальных случаях удобнее пользоваться понятием «поток», которое более привычно в отношении жидкостей и газов. К ним применяют понятие *потока массы*: $\Phi_m = dm/dt$ (см. параграф 2.4). Вектор скорости потока может составлять произвольный угол α с нормалью к поверхности dS . Принято считать, что вектор $d\mathbf{S}$ ориентирован в направлении этой нормали. На рис. 5.2, а стрелками показано направление потока жидкости, нормальное к его элементарному сечению dS_\perp . Из рис. 5.2, а следует, что за время dt через поверхность dS пройдет та же масса жидкости, что и через $dS_\perp = dS \cos \alpha$.

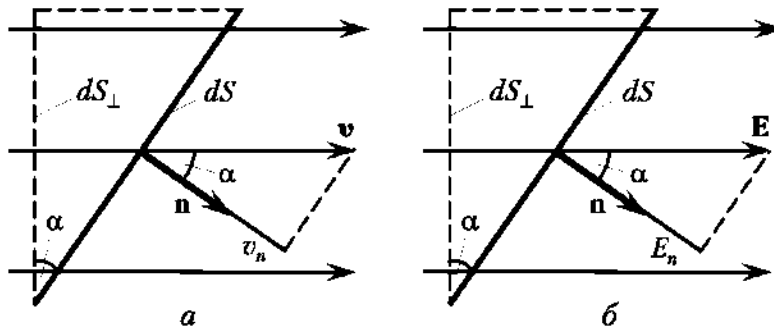


Рис. 5.2

На основании этого и формулы (2.23) $dm = \rho v dS \cos \alpha dt = \rho v dS dt = \rho v_n dS dt$, где ρ — плотность жидкости, а $v_n = v \cos \alpha$ — проекция вектора \mathbf{v} на нормаль \mathbf{n} к площадке dS . Отсюда элементарный поток массы

$$d\Phi_m = \frac{dm}{dt} = \rho v dS = \rho v_n dS.$$

При $\alpha < \pi/2$ $v_n > 0$ и $d\Phi_m > 0$; при $\alpha > \pi/2$ $d\Phi_m < 0$; при $\alpha = \pi/2$ $d\Phi_m = 0$. Поток массы через поверхность S произвольной формы равен

$$\Phi_m = \rho \int_S \mathbf{v} d\mathbf{S} = \rho \int_S v_n dS. \quad (5.6)$$

Аналогия с электростатическим полем базируется на том, что совокупность скоростей частиц жидкости в каждой точке ее потока образует *поле вектора* \mathbf{v} . Его линии таковы, что касательные к ним указывают направление вектора \mathbf{v} , а густота линий пропорциональна его модулю — аналогично силовым линиям вектора \mathbf{E} .

Формула (5.6) без коэффициента ρ приобретает смысл потока вектора \mathbf{v} :

$$\Phi_v = \int_S \mathbf{v} d\mathbf{S} = \int_S v_n dS. \quad (5.7)$$

Ровно те же операции можно осуществить и с потоком вектора \mathbf{E} (рис. 5.2, б):

$$d\Phi_E = \mathbf{E} d\mathbf{S} = E_n dS; \quad (5.8)$$

$$\Phi_E = \int_S \mathbf{E} d\mathbf{S} = \int_S E_n dS. \quad (5.9)$$

Пусть поверхность S имеет вид сферы радиусом R , нормали \mathbf{n} к элементам которой направлены наружу (рис. 5.3). Тогда в соответствии с формулой (5.8), если поток *выходит* из объема, замкнутого сферой, то $d\Phi_E > 0$ ($\alpha < \pi/2$), а если *входит* в него, то $d\Phi_E < 0$ ($\alpha > \pi/2$). На этом основании формулу (5.9) легко увязать с наличием в объеме зарядов и получить инструмент для расчета полей. Если в замкнутом объеме зарядов нет, то число входящих в него линий в точности равно числу выходящих. Отсюда

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = 0. \quad (5.10)$$

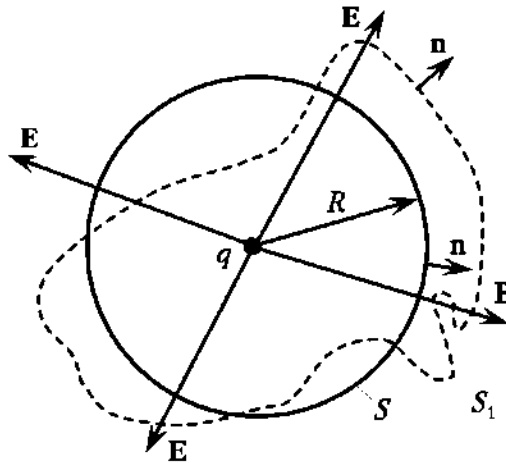


Рис. 5.3

Если вернуться к аналогии с потоком жидкости, то в мысленно выделенном объеме ее масса не может ни возрастать, ни убывать, за исключением случаев наличия в нем источника или стока массы (родник или другая особенность). То же относится к электростатическому полю. Если в объеме есть заряд q , то он изменяет число линий поля, которые при пересечении поверхности изменяют поток: $d\Phi_E > 0$ при $q > 0$ и $d\Phi_E < 0$ при $q < 0$. Для сферической поверхности S с точечным зарядом q в центре (см. рис. 5.3) имеем

$$\Phi_E = \oint_S \mathbf{E} d\mathbf{S} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^2} \oint_S dS = \frac{q}{\epsilon_0}. \quad (5.11)$$

Это справедливо и для замкнутой поверхности S_1 произвольной формы, которая на рис. 5.3 показана пунктиром. В формуле (5.11) Φ_E — алгебраическая величина, зависящая от знака заряда. Если же поверхность охватывает систему зарядов q_1, q_2, q_3, \dots , то

$$\Phi_E = \oint_S (\mathbf{E}_1 + \dots + \mathbf{E}_i) d\mathbf{S} = \Phi_{E_1} + \dots + \Phi_{E_i} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{k=1}^i q_k. \quad (5.12)$$

Эта формула выражает **теорему Гаусса для электростатического поля**, названную в честь немецкого математика и физика К. Гаусса (1777—1855): *поток вектора \mathbf{E} через произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов, которые она охватывает, деленной на ϵ_0* .

Теорема Гаусса особенно полезна при расчете полей в тех случаях, когда можно мысленно построить замкнутую поверхность, по отношению к которой $E_n = \text{const}$.

Примеры практики

Пусть бесконечная плоскость имеет поверхностную плотность заряда σ . Найдем напряженность поля, созданного ею в произвольной точке A . Из симметрии ясно, что по обе стороны плоскости $E = \text{const}$, а силовые линии перпендикулярны к ней. Вообразим замкнутую поверхность в виде цилиндра с основаниями, параллельными заряженной плоскости (рис. 5.4). Тогда поток линий \mathbf{E} через его боковую поверхность равен нулю ($\alpha = \pi/2$), а на основаниях $E = E_n = \text{const}$:

$$\Phi_E = \oint_S \mathbf{E} d\mathbf{S} = E \oint_S dS = ES = 2E\pi r^2,$$

где S — площадь обоих оснований. Так как заряд, охваченный цилиндрической поверхностью, равен $\sigma\pi r^2$, то в соответствии с формулой (5.12) получаем

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}. \quad (5.13)$$

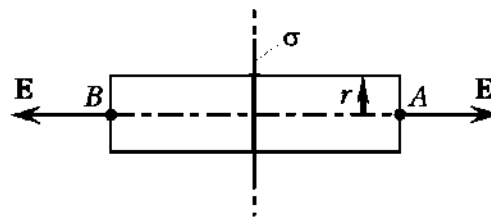


Рис. 5.4

5.3. Потенциал электростатического поля

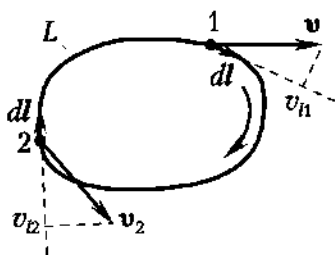


Рис. 5.5

Продолжая полезную аналогию с потоком жидкости, мысленно выделим в нем тонкую замкнутую трубку L произвольной формы (рис. 5.5). Вообразим, что всю воду, кроме находящейся в трубке, мгновенно заморозили. Будет ли вода по ней циркулировать? Выберем направление предполагаемой циркуляции, например по часовой стрелке.

В каждой точке трубки частицы воды с массой Δm и скоростью \mathbf{v} имеют в направлении элементов $d\mathbf{l}$ составляющие импульса $\Delta m \mathbf{v} d\mathbf{l}$. Поскольку вода несжимаема, они «толкают» всю воду в трубке. Следовательно, циркуляция определяется суммой

$$\Delta m \mathbf{v}_1 \Delta l_1 + \Delta m \mathbf{v}_2 \Delta l_2 + \dots + \Delta m \mathbf{v}_n \Delta l_n = \Delta m \sum_{i=1}^n \mathbf{v}_i \Delta l_i. \quad (5.14)$$

Если сумма равна нулю, то циркуляции нет, но тогда ее нет и в отсутствие трубки и заморозки, т.е. по такому контуру нет *завихрения*. Если же сумма (5.14) нулю не равна, то завихрение существует.

Рассмотренный пример позволяет понять, почему интеграл $\oint_L \mathbf{v} dl$ называется **циркуляцией** (см. также формулы (2.13), (2.14)).

Переходя теперь к вектору \mathbf{E} , можно его циркуляцию получить сразу: поскольку силовые линии вектора \mathbf{E} начинаются и заканчиваются только на зарядах, они вихрей вне зарядов образовать не могут, т.е. циркуляция равна нулю. Представим, что в электростатическом поле мы движемся по произвольной траектории 1-2-3, а затем возвращаемся к точке 1 через произвольную точку 4: 3-4-1, получая в целом замкнутую траекторию. Тогда

$$\oint \mathbf{E} dl = \int_{123} \mathbf{E} dl + \int_{341} \mathbf{E} dl = 0, \quad \int_{123} \mathbf{E} dl = - \int_{341} \mathbf{E} dl. \quad (5.15)$$

При умножении обеих частей равенства на q они превращаются в работу. Поэтому *работа электростатических сил на замкнутой траектории равна нулю или (что то же) их работа не зависит от формы траектории.*

Это означает, что электростатические силы, как и силы тяготения, являются **консервативными**.

В математическом отношении формула (5.15) означает, что $\mathbf{E} dl$ является полным дифференциалом некоторой функции φ :

$$\mathbf{E} dl = -d\varphi. \quad (5.16)$$

Отсюда следует физический смысл φ . Левая часть (5.16) с точностью до коэффициента q есть работа: $q\mathbf{E} dl = \delta A = -qd\varphi$.

ВОПРОС. Как работа консервативной силы сказывается на энергии тела?

ОТВЕТ был получен при рассмотрении силы тяготения (см. параграф 2.2): работа консервативной силы равна убыли *потенциальной энергии*:

$$-qd\varphi = -qE_{\parallel} dr. \quad (5.17)$$

Если в данном случае отнести потенциальную энергию E_{\parallel} к *единичному* заряду, то φ проявляется как **энергетическая характеристика** электростатического поля. Ее называют **потенциалом**:

$$\varphi = \frac{E_{\parallel}}{q}. \quad (5.18)$$

Потенциал данной точки поля показывает, какую потенциальную энергию имеет помещенный в нее единичный положительный заряд.

Единицей потенциала является **вольт (В)**. Из формулы (5.18) следует: $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$, а из формулы (5.16) следует единица напряженности В/м. Интегрируя соотношение (5.16) в пределах от одной точки поля до другой, можно найти *разность потенциалов* между ними. Полагая, что на *бесконечном* удалении от заряда созданное им поле уже не действует ($\varphi = 0$), можно вычислить и *абсолютное* значение потенциала. Например, для точки, находящейся на расстоянии r от точечного заряда,

$$\varphi = \int_r^{\infty} \mathbf{E} dl = \int_r^{\infty} E dr = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_r^{\infty} \frac{dr}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}, \quad (5.19)$$

где использовано $E dl = Edl \cos \alpha = E dr$. Пользуясь формулой (5.19), нетрудно убедиться, что принцип суперпозиции распространяется и на потенциал: *потенциал данной точки поля, созданного системой зарядов, равен сумме потенциалов полей, образованных каждым из них в отдельности.*

Поверхность с постоянным потенциалом называется **эквипотенциальной поверхностью**. Ее форма, например, для поля точечного заряда следует из формулы (5.19): $\varphi = \text{const}$ при $r = \text{const}$, т.е. она является сферической. Поскольку силовые линии здесь радиальны, они *перпендикулярны* эквипотенциальной поверхности.

ВОПРОС. Всегда ли это так — ведь и силовые линии, и эквипотенциальные поверхности могут иметь самые разные формы?

ОТВЕТ. При перемещении по эквипотенциальной поверхности $d\varphi = 0$, т.е. $\delta A = 0$, несмотря на то что $E \neq 0$. Это возможно лишь в том случае, если вектор E ортогонален вектору dl (это изучают в лабораторном практикуме).

Таким образом, *силовые линии всегда ортогональны эквипотенциальным поверхностям.*

Если в электростатическое поле попадает *свободный* заряд, то оно преобразует свою потенциальную энергию в работу по его перемещению, которая идет на приращение кинетической энергии носителя заряда. Например, в электроннолучевой трубке электростатическое поле разгоняет электроны так, что их удары о люминофор экрана вызывают его флуоресценцию. При $v_0 = 0$

$$q\Delta\varphi = \frac{mv^2}{2}. \quad (5.20)$$

Отсюда и внесистемная единица энергии, которой пользуются при рассмотрении явлений электромагнетизма, — **электронвольт (эВ)**: $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot \text{В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

5.4. Поле внутри и вне проводника

Под действием электростатического поля положительные и отрицательные заряды нейтрального вещества *смещаются* в противоположные стороны, образуя тем самым *собственное электрическое поле*. Это явление называют **электростатической индукцией**, а разделенные заряды — **индуцированными**. Установившееся в веществе поле определяется наложением внешнего и индуцированного полей, а количественный результат зависит от свойств вещества.

Проводник содержит практически неограниченный запас собственных свободных зарядов, которые могут свободно перемещаться по его объему. То же относится к зарядам, полученным извне. К проводникам относятся металлы, плазма и электролиты. Под действием внешнего поля свободные электроны проводника быстро смещаются, оставляя позади себя нескомпенсированный положительный заряд.

ВОПРОС. До каких пор это происходит?

ОТВЕТ. По мере роста числа разделенных зарядов растет и напряженность создаваемого ими поля, которое *антипараллельно* напряженности внешнего поля. Когда они по модулю станут равны, исчезнет и сила, разделяющая заряды.

Таким образом, в равновесном состоянии напряженность поля внутри проводника равна нулю, т.е. объем проводника является эквипотенциальной областью.

На поверхности проводника заряды также неподвижны. Из этого следует, что составляющая вектора \mathbf{E} , параллельная поверхности, равна нулю, т.е. и поверхность проводника эквипотенциальна. Это означает, что вектор \mathbf{E} всегда перпендикулярен поверхности проводника.

Поскольку нескомпенсированные заряды проводника располагаются в тонком слое его поверхности, то при удалении вещества из внутренней области распределение зарядов поверхности не изменится. Этим пользуются для накопления очень больших зарядов и соответствующих потенциалов (в миллионы вольт) в электростатическом генераторе, предложенном американским физиком Р. Ван де Граафом (1901—1967). Внутренней поверхности полого металлического шара сообщают все новые заряды, и они переходят на его внешнюю поверхность. Полые проводники применяют и для защиты (экранирования) различных радиоэлектронных установок, например, от электромагнитного импульса, возникающего при ядерном взрыве (см. параграф 11.6). Чаще используют сетку с мелкой ячейкой — она экранирует поле чуть хуже, но содержит меньше металла и позволяет наблюдать находящееся внутри оборудование.

ВОПРОС. Если заряженный проводник имеет неправильную форму, то где больше напряженность поля — у острия или у закругленного участка?

ОТВЕТ. Эквипотенциальные поверхности вблизи поверхности проводника повторяют ее форму, а на больших расстояниях она стремится к сферической, по мере того как заряд проводника стремится к точечному (на рис. 5.6 это для наглядности показано не в масштабе). В соответствии с формулой (5.16) $E = -d\varphi/dl$. Поскольку вблизи остриев расстояние между эквипотенциальными поверхностями меньше, чем у закруглений, то напряженность поля больше. Она может вызвать даже ионизацию воздуха и стекание зарядов с поверхности.

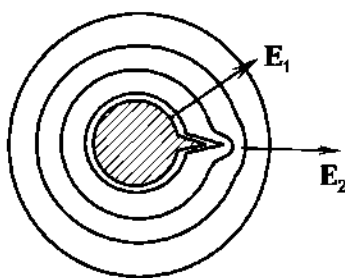


Рис. 5.6

Свечение мачт судов, так называемые огни святого Эльма, описано римским философом Плинием еще в I в. (святой Эльм считался покровителем моряков). В линиях электропередачи это приводит к потерям электроэнергии. Свечение шпилей зданий и других остроконечных предметов в грозовую погоду также связано с этим явлением. Оно используется в ионизаторах воздуха, пыле- и дымоочистителях.

В некоторых электровакуумных приборах мелкие острия, вырастающие на ртутных катодах, способствуют зажиганию газового разряда и т.д.

ВОПРОС. Как связана напряженность поля вблизи проводника с поверхностной плотностью его заряда?

ОТВЕТ. Можно получить ответ с помощью теоремы Гаусса. Выберем замкнутую поверхность в виде цилиндра с основаниями, параллельными поверхности проводника, подобно тому как это сделано выше на рис. 5.4. Одно из оснований цилиндра разместим вне проводника, а другое внутри него — там, где поля нет (рис. 5.7). Тогда весь поток силовых линий из объема цилиндра проходит только через внешнее основание. По сравнению с заряженной плоскостью площадь, через которую проходят силовые линии, уменьшается вдвое, поэтому напряженность поля вдвое больше, чем в выражении (5.13):

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}. \quad (5.21)$$

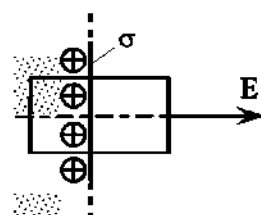


Рис. 5.7

5.5. Конденсаторы и энергия электростатического поля

Если суммировать потенциалы всех точечных зарядов проводника, то в соответствии с формулой (5.19) получим

$$q = C\phi, \quad (5.22)$$

где q — общий заряд проводника; C — коэффициент пропорциональности, который называется **электроемкостью**, или **емкостью**, проводника. Это понятие ввел Г. Кавендиш, а первые конденсаторы (лейденская банка) демонстрировали в XVIII в., подключая к ним шеренги людей (монахов, гвардейцев и т.д.).

По аналогии со словом «емкость», употребляемым в быту, электроемкость характеризует тело как «вместилище зарядов»: чем больше емкость, тем больше вместимость — меньше изменяется потенциал тела при сообщении ему заряда. *Электроемкость показывает, какой заряд нужно сообщить телу, чтобы его потенциал изменился на 1 В.*

Из формулы (5.22) следует единица емкости **фарад (Ф)**, названная в честь М. Фарадея: $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}$. Электроемкость *уединенного* тела мала — даже у земного шара она $\sim 7 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}$. Однако уединение — понятие относительное: в окрестностях любого земного тела находятся другие тела, и чем они ближе, тем больше влияют на его емкость, так как первый заряженный проводник индуцирует на незаряженном втором проводнике заряд *противоположного* знака. Это понижает потенциал первого проводника при том же его заряде, т.е. его емкость возрастает — *система проводников имеет емкость большую, чем уединенный проводник*. Чем ближе проводники друг к другу, тем сильнее взаимное влияние их зарядов и меньше влияние других тел.

Система близко расположенных проводников, концентрирующих между собой электростатическое поле, называется **конденсатором**.

Обкладки конденсатора заряжены равными по величине и противоположными по знаку зарядами. Поскольку поле конденсатора сосредоточено между его обкладками, в формуле (5.22) вместо *потенциала* изолированного проводника фигурирует *разность потенциалов* между проводниками, или напряжение:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U} \quad (5.23)$$

где q — заряд одной из обкладок. Формула (5.23) служит инструментом определения емкости конденсаторов различной геометрии. Например, для плоского конденсатора с расстоянием d между пластинами, интегрируя соотношение (5.16), получаем $Ed = U$. В свою очередь, напряженность поля E у пластины конденсатора с поверхностной плотностью заряда σ определяется выражением (5.21). Из этих двух формул при площади пластины S получаем $qd/(\epsilon_0 S) = U$, что при сопоставлении с формулой (5.23) дает

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d}. \quad (5.24)$$

Таким же образом можно рассчитать емкость конденсатора, образованного, например, коаксиальными цилиндрами с радиусами R и r и высотой h :

$$C = 2\pi\epsilon_0 h / \ln(R/r). \quad (5.25)$$

Для получения различных комбинаций емкостей и рабочих напряжений конденсаторы соединяют. При *параллельном* соединении заряд батареи равен сумме зарядов конденсаторов, а при *последовательном* соединении соседние пластины разных конденсаторов имеют один и тот же заряд. Отсюда нетрудно получить для параллельного соединения формулу

$$C = C_1 + C_2 + \dots,$$

а для последовательного —

$$1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots$$

Конденсаторы выполняют функции *накопителей электростатической энергии*. Ее можно определить как энергию взаимодействия зарядов его обкладок:

$$W = |q_2\varphi_1| = |q_1\varphi_2| = \frac{1}{2}(q\varphi_2 - q\varphi_1) = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}, \quad (5.26)$$

где q — заряд одной из пластин, учтены знаки зарядов и выражение (5.24). Запасенная в конденсаторе энергия выделяется при его разряде в колебательном контуре, при запуске лазеров, люминесцентных ламп, сварочных аппаратов и т.д.

Подстановка выражения (5.24) в формулу (5.26) позволяет отвлечься от обкладок конденсатора и определить энергию *собственно электростатического поля*:

$$W = \frac{\epsilon_0 S U^2}{2d} = \frac{\epsilon_0}{2} \left(\frac{U}{d}\right)^2 Sd = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 V, \quad (5.27)$$

где использовано равенство $E = U/d$, а $V = Sd$ — объем пространства, где сосредоточено поле. Поскольку в плоском конденсаторе поле *однородно*, это позволяет найти и *плотность энергии*:

$$w = \frac{W}{V} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2. \quad (5.28)$$

Формула (5.28) уже не связана с конфигурацией конденсатора и относится к самому электростатическому полю.

5.6. Диэлектрики в электростатическом поле

В отличие от проводника, заряды диэлектрика несвободны — они *связаны* в пределах атома и потому гораздо слабее реагируют на электрическое поле. Диэлектрики применяют для электрической *изоляции* проводников. Значит ли это, что бакелитовые, эбонитовые, фторопластовые, слюдяные, бумажные и прочие элементы конструкций никак не влияют на электрическое поле?

Если у нейтральной молекулы диэлектрика заряды $+q$ и $-q$ смещены друг относительно друга, то они образуют так называемый **диполь** (рис. 5.8, а). Такие молекулы и состоящие из них диэлектрики называют **полярными** (H_2O , CO и т.д.). Тепловое движение молекул хаотизирует ориентацию диполей, и потому результирующая напряженность поля в диэлектрике равна нулю. Однако в электростатическом поле возникает пара сил (см. рис. 5.8, а), которая поворачивает диполь вокруг центра S его инерции, чтобы сориентировать его вдоль силовой линии. Чем больше напряженность поля, тем в большей степени выполняется эта ориентация, несмотря на хаотизирующее влияние теплового движения.

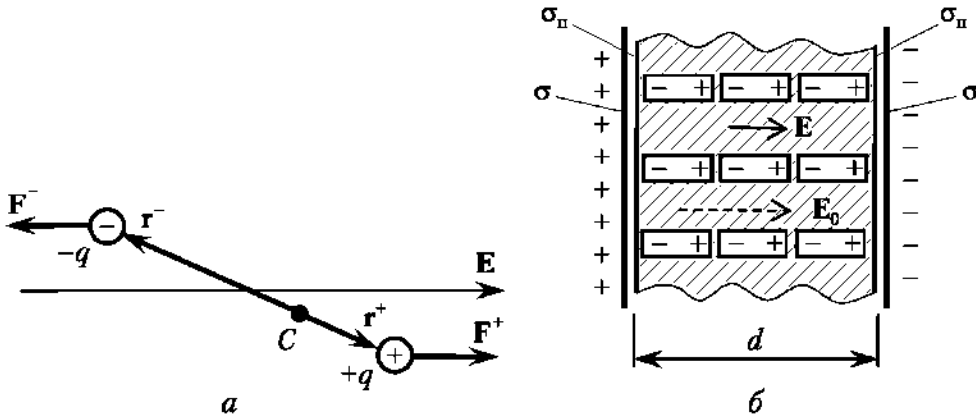


Рис. 5.8

Наряду с полярными, существуют и **неполярные молекулы**, у которых положительные и отрицательные заряды *пространственно* не разделены (O_2 , N_2 и т.д.). Однако под действием внешнего поля они смещаются в противоположные стороны и также образуют диполи, ориентированные вдоль силовых линий.

Процесс ориентации диполей диэлектрика под действием электростатического поля называется **поляризацией**.

Поляризацию можно рассматривать как вариант электростатической индукции. Результат поляризации также сводится к поверхностным зарядам: заряды диполей разного знака, находящихся в объеме, компенсируют, а на *поверхности* формируют **связанный поляризационный заряд** с поверхностной плотностью σ_p (рис. 5.8, б). Будучи противоположным по знаку свободному заряду (создающему поле), он его частично нейтрализует, что вносит поправку в выражение (5.21):

$$\varepsilon_0 E = \sigma - \sigma_p$$

Таким образом, *напряженность поля в диэлектрике по сравнению с вакуумом уменьшается:*

$$E = E_0/\epsilon. \quad (5.29)$$

Коэффициент ϵ называется **диэлектрической проницаемостью вещества**. Поскольку у каждого диэлектрика она своя, это побуждает ввести такую силовую характеристику электростатического поля, которая от наличия диэлектрика не зависит. Она называется **электрическим смещением D** :

$$D = \epsilon\epsilon_0 E. \quad (5.30)$$

Из формул (5.29) и (5.30) следует, что $D = \epsilon_0 E_0$, где E_0 определяется уже только *свободными зарядами*.

Формула (5.29) вносит уточнения и в соотношения (5.23), (5.28):

$$C = \frac{q}{Ed} = \frac{q\epsilon}{E_0 d} = \frac{q\epsilon}{U_0} = \epsilon C_0, \quad (5.31)$$

$$w = \frac{W}{V} = \frac{1}{2} \epsilon\epsilon_0 E^2, \quad (5.32)$$

где величины U_0 , C_0 относятся к конденсатору без диэлектрика.

Чувствительность емкости конденсатора к среде между его обкладками, а также к их геометрии и относительному положению используют в **датчиках** — важнейшей составляющей природных и рукотворных систем, в том числе военных.

Примеры практики

Если голод указывает организму на потребность в пище, то датчик разряда батареи указывает на ее «чувство голода». Если повышенная температура тела — симптом болезни, то повышенная температура, фиксируемая датчиком в боевом отсеке подводной лодки или самолета, — симптом неполадок. Если кровотечение — это результат ранения, то бортовой датчик, фиксирующий спад давления воздуха в бомбардировщике, указывает на пробоину и т.д.

В сущности, танк, ракета или авианосец — это искусственные организмы. В живом организме сигналы датчиков обрабатываются мозгом, а в боевых системах — автоматом, компьютером, оператором или командиром. Реакция на сигналы датчиков — команды, поступающие на исполнительные механизмы. Например, несанкционированное пересечение границ охраняемой зоны приводит к звуковой сирене, световым вспышкам или срабатыванию защиты. Приблизившись к объекту противника, ракета своими датчиками реагирует на его тепловое излучение или на собственный отраженный от нее сигнал и т.д.

Искусственные датчики обладают зачастую много лучшими параметрами, чем естественные. Например, датчики локатора с гораздо большей точностью оценивают расстояние до противника и его скорость, чем глаза человека. В то же время в отношении точности датчики являются самым слабым местом современных средств приема-передачи и обработки информации — именно от них в основном зависят надежность и боевая эффективность различных видов ВВТ. Например, результат взаимодействия снаряда и цели определяется непрерывным получением и обработкой информации об их относительном положении, скоростях, ускорениях, воздействии среды и т.д. Роль физики здесь трудно переоценить, причем не только в части датчиков, но и в остальной элементной базе информационных систем.

В сложных системах работают тысячи датчиков температуры, давления, радиации, освещенности, механических напряжений, линейных и угловых координат, скоростей и ускорений, расходов жидкостей и газов. В каждом из них измеряемую неэлектрическую величину преобразуют в пропорциональную ей электрическую, поскольку электрические измерения отличаются точностью, чувствительностью, возможностью дистанционного измерения и автоматизации. Особенно ценны малогабаритные и устойчивые к внешним воздействиям датчики с цифровым выходом для компьютерной обработки сигнала. Существуют, например, датчики, способные, несмотря на огромные температуры и давления в стволе орудия, передавать телеметрическую информацию о движении в нем снаряда.

Конденсатор может быть использован, например, в качестве инерциального датчика ускорений (см. подпараграф 1.1.4). Три его пластины образуют два конденсатора, соединенных последовательно. Две крайние закреплены жестко, а центральная, смещаясь под действием сил инерции, изменяет емкости конденсаторов, которые могут входить в состав микроэлектромеханической системы (МЭМС). Ее реализуют в едином кристалле (размером с ноготь), включающем не только чувствительный элемент, но и схему формирования выходного сигнала.

Емкостные датчики применяют для определения состава смесей, измерения уровня жидкости, преобразования механических перемещений и др., а их чувствительность больше, чем многих других.

При снятии внешнего поля тепловое движение молекул дезориентирует молекулярные диполи. Однако некоторые *расплавленные* диэлектрики (смолы, полимеры, стекла и ситаллы), охлаждаемые в сильном электрическом поле, способны сохранять ориентацию молекул и после снятия поля. Полученные таким образом **электреты** уже сами могут служить источниками постоянного электрического поля, что используют в датчиках, микрофонах, телефонах и т.д.

У **сегнетоэлектриков** поляризованы относительно большие области, именуемые **доменами**. В обычном состоянии дипольные моменты доменов ориентированы произвольно, и потому в целом поляризованность диэлектрика равна нулю. Однако под влиянием внешнего поля растет объем тех доменов, которые случайно оказались ориентированными вдоль силовых линий. Если же внешнее поле уменьшать, то поляризованность уменьшается с «запаздыванием» по сравнению с кривой ее роста. Это явление называют **гистерезисом**. При полном снятии поля ($E = 0$) у сегнетоэлектриков остается некоторая остаточная поляризованность P_r , которая позволяет их использовать, как и электреты, в качестве источников поля. Аналогичная кривая гистерезиса наблюдается у ферромагнетиков (см. параграф 6.5).

У некоторых сегнетоэлектриков (сегнетова соль, кварц, титанат бария и др.) поляризованность возникает под действием растяжения (сжатия), что называют **прямым пьезоэффектом**. Его открыли Пьер и Жак Кюри в 1880 г. Зависимость возникшего напряжения от *механических нагрузок* используют в газовых зажигалках для формирования искры, в микрофонах и **пьезодатчиках**, которые применяют, например, для фиксации детонаций двигателя. В пьезодатчике ускорения сила инерции деформирует кристалл, и на его гранях возникает измеряемая разность потенциалов. То же — при встрече снаряда или гранаты с преградой: механическая нагрузка на пьезоэлемент инициирует импульс напряжения, подаваемый на электродетонатор взрывателя, и т.д.

Обратный пьезоэффект состоит в том, что под действием внешнего напряжения сегнетоэлектрик *деформируется*. Это явление применяют для преобразования электрических колебаний в механические, например в гидролокаторах — источниках ультразвука на подводных лодках.

5.7. ПОСТОЯННЫЙ ТОК

Электростатическая индукция в проводнике и диэлектрике приводит лишь к *кратковременному* смещению зарядов вещества — до нового положения равновесия. Если же в проводнике *поддерживать* электрическое поле, то в нем возникает *постоянное* направленное движение зарядов, которое называют **электрическим током**. Это явление во многом определяет само существование современной цивилизации — быт, здоровье, коммуникацию и деятельность человека. В одной только колесной и гусеничной технике с помощью электрического тока раскручивают коленчатый вал двигателя, поджигают рабочую смесь в его цилиндре, освещают дорогу, контролируют работу агрегатов, создают звуковые сигналы, обеспечивают связь, приводят в действие электропривод различных механизмов.

Локальной характеристикой электрического тока является **плотность тока**:

$$j = \frac{dq}{dSdt}, \quad (5.33)$$

где dq — заряд, проходящий за время dt через поперечное сечение проводника площадью dS . Единицей плотности тока является **ампер на метр квадратный** (A/m^2).

Теорию электропроводности разработал Х. А. Лоренц (1853–1928). Он исходил из представления, что свободные заряды проводника, подобно молекулам газа, движутся *хаотично*, сталкиваясь друг с другом и с нейтральными атомами. При появлении электрического поля на это движение накладывается *направленная* скорость v . Такое движение подобно рассмотренным в параграфе 4.4 явлениям переноса и называется **дрейфом**. Как и при диффузии, вязкости и теплопроводности, скорость v направленного движения здесь много меньше, чем хаотического. Например, в металлах $v \approx 10^{-4}$ м/с, причем при каждом столкновении заряд ее теряет, а на следующей длине свободного пробега вновь наращивает (рис. 5.9, а).

Прибегнем к такому же приему, что и в параграфе 4.4. Вообразим цилиндр, образующая которого параллельна скорости v дрейфа и имеет длину vdt (см. рис. 5.9, а). За время dt через площадку dS пройдут все электро-

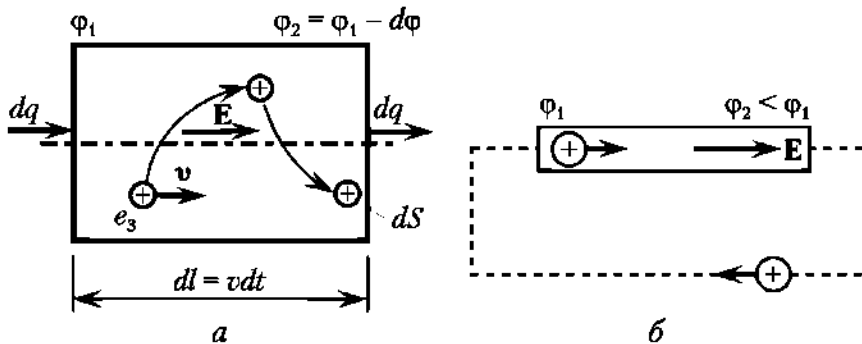


Рис. 5.9

ны, содержащиеся в объеме цилиндра: $dq = envdSdt$, где e — элементарный заряд; n — концентрация носителей тока. Подставляя это выражение в формулу (5.33), получаем

$$j = env. \quad (5.34)$$

Поскольку скорость v дрейфа пропорциональна напряженности поля E , то

$$j = \sigma E, \quad (5.35)$$

где коэффициент σ называется **удельной электропроводностью**. Формула (5.35) выражает **закон Ома в локальной форме**, названный в честь немецкого физика Г. Ома (1789—1854): *плотность тока пропорциональна напряженности поля*.

Из формулы (5.33) получаем соотношение $jdS = dq/dt$. Если по сечению проводника $j = \text{const}$, то

$$jS = I = \frac{dQ}{dt}, \quad (5.36)$$

где I — **сила тока**; Q — заряд, проходящий через *все* сечение S проводника.

Сила тока показывает, какой заряд проходит через поперечное сечение проводника в единицу времени.

Единица силы тока **ампер (А)** — одна из основных единиц СИ, названная в честь французского физика, математика и химика А.-М. Ампера (1775—1836).

Умножив обе части равенства (5.35) на площадь S поперечного сечения проводника, получим закон Ома для участка цепи:

$$I = \sigma SE = \frac{\sigma SU}{l} = \frac{U}{R}, \quad (5.37)$$

где $R = \rho l/S$ — сопротивление проводника; $\rho = 1/\sigma$ — **удельное сопротивление**; U — напряжение между сечениями проводника, находящимися на расстоянии l друг от друга (предполагается, что $j = \text{const}$, $E = \text{const}$ и проводник однороден). Единицей сопротивления является **Ом** ($1 \text{ Ом} = 1 \text{ В/А}$), а удельного сопротивления — **Ом·м**.

Формула (5.37) имеет множество применений. Например, испытываемый человеком электрический удар определяется силой тока и путем его прохождения, из которых самый опасный — это правая рука — ноги. А сила тока I определяется влажностью кожи, упитанностью и другими характеристиками тела.

Исходя из того что через последовательно соединенные сопротивления течет один и тот же ток, а на параллельно соединенных сопротивлениях — одно и то же напряжение, нетрудно получить для последовательного соединения

$$R = R_1 + R_2 + \dots,$$

а для параллельного —

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots.$$

Электрический ток является носителем *электроэнергии*. Рассчитать ее можно, исходя из того что при $I = \text{const}$ через основания цилиндра на рис. 5.9, a входит и выходит один и тот же заряд $dq = Idt$. Пройдя разность потенциалов $d\phi = Edl$, он приобретает энергию $dW = IdtEdl$. При этом $j = \text{const}$, т.е. приобретенная энергия не сказалась на скорости дрейфа.

ВОПРОС. Куда же девалась эта энергия?

ОТВЕТ. Она теряется при столкновениях на локальном уровне: носители тока передают ее нейтральным частицам и друг другу. Тем самым энергия тока преобразуется в тепловую. *Теплота, выделяемая в единице объема в единицу времени, равна*

$$\frac{dW}{dVdt} = \frac{IdtEdl}{Sdldt} = jE = \sigma E^2. \quad (5.38)$$

Это закон Джоуля — Ленца в локальной форме, характеризующий *удельную тепловую мощность тока*. В объеме dV выделяется мощность

$$\frac{dW}{dt} = \sigma E^2 dV = \frac{1}{\rho} \left(\frac{d\phi}{dl} \right)^2 S dl,$$

а в однородном проводнике *конечных размеров*

$$P = \frac{1}{\rho} \left(\frac{U}{l} \right)^2 Sl = \frac{U^2 S}{\rho l} = \frac{U^2}{R} = IU = I^2 R, \quad (5.39)$$

где использован закон Ома (5.32). Это закон Джоуля — Ленца для участка цепи. Он был получен эмпирически Дж. Джоулем (1818—1889) и российским физиком Э. Х. Ленцем (1804—1865), а затем его теоретически обосновал Р. Клаузиус.

Джоулева теплота влияет и на ту причину, которая ее породила (отрицательная обратная связь). Рост температуры металла означает увеличение амплитуды колебаний узлов кристаллической решетки. При этом носители тока — электроны сталкиваются с ними чаще, т.е. длина свободного пробега, на которой они приобретают скорость v дрейфа, уменьшается. Соответственно уменьшается электропроводность σ , т.е. увеличивается удельное сопротивление ρ :

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad (5.40)$$

где α — температурный коэффициент сопротивления (эти соображения скорректировала впоследствии квантовая физика — см. параграф 10.4). У металлов $\alpha = 1/273 \text{ K}^{-1}$ и слабо зависит от температуры.

Джоулева теплота применяется в электрообогревателях, плавильных печах, сварочных аппаратах, лампах накаливания, плавких предохранителях и т.д.

5.8. Законы Ома и Джоуля — Ленца для полной цепи

ВОПРОС. Если на левом конце проводника (см. рис. 5.9, а) создан избыток заряда по отношению к правому, то будет ли он поддерживать постоянный ток?

ОТВЕТ. Перемещение заряда слева направо уменьшает этот перекоп. Соответственно уменьшаются $d\phi$ и E , пока ток не исчезнет. Для поддержания постоянного тока нужно *постоянно* восстанавливать разделение зарядов (рис. 5.9, б).

ВОПРОС. Могут ли это осуществлять электростатические силы?

ОТВЕТ. Нет. Как следует из материала параграфа 5.3, их работа на замкнутой траектории *всегда* равна нулю — они, наоборот, устраняют разделение зарядов. Здесь требуются силы, действующие *против* них, *посторонние* по отношению к ним. Их поэтому и называют *сторонними*.

Совершенно аналогичная ситуация возникает и в другом потенциальном поле — поле тяготения. Если на сваю падает тяжелый боек, то падение бойка само собой не повторится, так как поле тяготения не может вернуть его в исходную точку. Здесь требуется *сторонняя* сила, которую создает двигатель механического подъемника.

В электростатической машине также действует механическая сторонняя сила, перебрасывающая заряды. Однако чаще применяют явления, возникающие *при контакте металлов с электролитами* (аккумуляторы) или *при вращении рамки в магнитном поле* (генераторы).

Участок электрической цепи, на котором действуют сторонние силы, называется **неоднородным** (рис. 5.10). Наличие в нем сторонних сил требует уточнения понятия «напряжение».

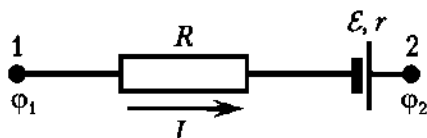


Рис. 5.10

Напряжением на участке цепи называют работу электростатических и сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда:

$$U_{12} = \int_{12} \mathbf{E} dl + \int_{12} \mathbf{E}_{\text{ст}} dl, \quad (5.41)$$

где $\mathbf{E}_{\text{ст}}$ — напряженность поля сторонних сил. Содержащий ее интеграл характеризует *работу сторонних сил*. Он обозначается символом \mathcal{E} и называется **электродвижущей силой** (ЭДС) на данном участке (термин сложился исторически, хотя в действительности это не сила, а работа). Уравнению (5.41) можно придать вид **закона Ома для неоднородного участка цепи**:

$$I(R + r) = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}, \quad (5.42)$$

где r — внутреннее сопротивление источника ЭДС. В сложных электрических цепях встречаются и такие участки, где ЭДС действует *против* направления тока. Поэтому I и \mathcal{E}_{12} , входящие в уравнение (5.42), — величины *алгебраические*: $I > 0$, если ток течет в выбранном направлении обхода участка $1 \rightarrow 2$; $\mathcal{E}_{12} > 0$, если сторонние силы действуют на положительные заряды в том же направлении, т.е. направление обхода пересекает источник сторонних сил от его отрицательного полюса к положительному (см. рис. 5.10).

Если сечения 1 и 2 соединить, то образуется **полная (замкнутая) цепь**, в которой теперь $\varphi_1 = \varphi_2$. В таком случае уравнение (5.42) принимает вид **закона Ома для полной цепи**:

$$I(R + r) = \mathcal{E}, \quad (5.43)$$

где индексы теперь опущены из-за совпадения точек 1 и 2, т.е. ЭДС равна работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда по полной цепи.

Умножая обе части уравнения (5.43) на I , получим и закон Джоуля — Ленца для полной цепи:

$$I^2(R + r) = I\mathcal{E}. \quad (5.44)$$

Из него следует важный вывод: *теплота, выделяемая в электрической цепи, производится сторонними силами.*

Компонент мощности I^2r характеризует неизбежные потери энергии, для уменьшения которых внутреннее сопротивление r источника ЭДС должно быть как можно меньше. У автомобильных аккумуляторов, например (изучаемых в лабораторном практикуме), оно равно $\sim 10^{-2}$ Ом.

5.9. Газовый разряд и плазма

В связи с отсутствием свободных зарядов электрический ток в диэлектрике возможен только при их генерации внутри диэлектрика или при поступлении зарядов извне. В *газах* возможна *ионизация* молекул — в результате удара или под действием кванта света нейтральная молекула распадается на электрон и положительный ион. Ток в газах называют **газовым разрядом**. Если при устранении источника ионизации ток прекращается, то газовый разряд называют **несамостоятельным**. Если же напряженность поля в газе достаточно велика, то она обеспечивает постоянную ионизацию. Первичный электрон может выбить из нейтральной молекулы следующий: их становится два и т.д.

В электрическом поле электроны и положительные ионы движутся в противоположные стороны со средними скоростями дрейфа v_- и v_+ соответственно. Поэтому плотность тока (см. формулу (5.34)) равна

$$j = qn(v_+ + v_-). \quad (5.45)$$

Как следует из формулы (5.20), $v_- \sim 1/\sqrt{m}$. Поскольку масса электрона в 10^3 – 10^4 раз меньше массы иона, то $v_- \gg v_+$, т.е. плотность тока определяют главным образом электроны, однако и положительные ионы газового разряда играют важную роль. Во-первых, они нейтрализуют отрицательный заряд электронов, что способствует почти такому же свободному протеканию тока, как в проводнике. Во-вторых, положительные ионы содействуют *размножению* электронов. В газоразрядном приборе, содержащем катод и анод (например, неоновой лампе), электроны движутся к аноду, а ионы — к катоду, где вырывают из него вторичные электроны. Это явление получило название «вторичная ионно-электронная эмиссия» (см. параграф 10.6).

Пусть электрон на пути к аноду успел создать столько ионов, сколько нужно для выбивания ими из катода одного вторичного электрона. Тем самым первый электрон обеспечил свое воспроизведение, и для поддержания тока внешний ионизатор уже не нужен: разряд поддерживает себя сам и потому называется **самостоятельным**. Его вид зависит от происхождения носителей тока и напряженности поля.

Глеющий разряд возникает при холодном катоде, сравнительно высоких напряжениях и малых токах.

В *дуговом* разряде ток достаточно велик, чтобы разогреть катод. При этом помимо вторичной ионно-электронной эмиссии возникает и *термоэмиссия* электронов (см. параграф 10.6). Такой разряд поддерживать легче, и потому напряжение на газовом промежутке заметно меньше.

Природным разрядом, близким к *искровому*, является *молния*, а искусственным — разряд в свече зажигания ДВС.

Коронный разряд обсуждался в параграфе 5.4 — он возникает в связи с высокой напряженностью поля вблизи остриев.

В газовом разряде электроны и ионы перемешаны, а если их концентрации велики, то они строго равны. Такое состояние вещества называют **плазмой**. Она электрически нейтральна и потому является хорошим проводником. Если вообразить, что даже в малом объеме электроны сместились относительно положительных ионов, то большая кулоновская сила тут же ликвидирует такой перекося. Подобные процессы вызывают в плазме колебания.

Плазму считают *четвертым состоянием вещества* (кроме твердого, жидкого и газообразного). Таково не только исходное, но и нынешнее состояние Вселенной: ее вещество представлено в основном именно плазмой. Звезды, включая наше Солнце, — это высокотемпературные плазменные сгустки, в которых нейтральные частицы вообще отсутствуют: вещество полностью ионизировано. Внешняя часть атмосферы Земли — ионосфера, — подвергаясь воздействию солнечного излучения, превращается в плазму.

В плазме происходят сложные механические, термодинамические, электрические, оптические и другие явления. В процессе столкновений частиц наряду с ионизацией возникает возбуждение атомов с последующим *излучением* электромагнитных волн разной частоты. В свою очередь, излучение влияет на ионизацию и т.д. Кроме того, происходит воссоединение электронов и ионов в нейтральную молекулу (*рекомбинация*), которое также сопровождается выделением энергии.

Плазма — не только сложный, но и весьма важный объект изучения и на Земле. В последние полвека высокотемпературной плазмой усиленно занимаются с целью получения *управляемых термоядерных реакций* в качестве источника энергии. Задача эта весьма сложна, требует больших затрат, и потому ее решением занимаются на международном уровне. Получают такую плазму, например, с помощью мощных лазеров (см. параграф 2.5). Для поджига и удержания термоядерной плазмы используют также установки типа «Токамак» (см. параграф 6.5).

Широко применяется и низкотемпературная плазма. Она служит источником излучения в сигнальных, цифровых и индикаторных табло, телевизионных экранах, в качестве рабочего тела термоэлектрических преобразователей, лазеров, гироскопов и т.д. Дуговой разряд используют для плавки, резки и сварки металлов. Коронный разряд применяют, например, для электризации диэлектрического барабана ксерокса. Плазменное напыление позволяет получать износо- и термостойкие покрытия деталей двигателей. Существуют ракетные двигатели, которые в качестве рабочего тела используют ускоренную плазму, и т.д.

Резюме

Подводя итоги настоящей главы, отметим ее основные положения.

Базой электростатики являются закон Кулона и понятия «точечный заряд», «принцип суперпозиции», «электростатическое поле». Его силовая характеристика — напряженность поля, а энергетическая — потенциал. Действенным инструментом расчета полей является теорема Гаусса.

Поле, созданное индуцированными зарядами, полностью компенсирует внешнее поле внутри проводника и частично — внутри диэлектрика. Диэлектрик конденсатора увеличивает его емкость и запасенную в нем энергию.

Для поддержания в проводнике постоянного тока необходимы сторонние силы, которые производят аккумуляторы и генераторы. Постоянный ток подчиняется законам Ома и Джоуля — Ленца и играет огромную роль в природе и технике, в том числе относящийся к ВВТ.

Вопросы для самоконтроля

1. Чем объяснить удаление пыли из воздуха с помощью постоянного электрического поля?
2. При каком условии заряженная пылинка будет висеть между горизонтальными пластинами заряженного конденсатора?
3. Какое ускорение приобретает электрон, двигаясь по эквипотенциальной поверхности с потенциалом 120 В?
4. Почему в момент загорания электролампа горит ярче, чем потом?
5. Почему при наполнении автомобильной цистерны бензином ее и опорожняемую емкость соединяют между собой проводником и заземляют?
6. Какую замкнутую поверхность и почему целесообразно выбрать для расчета напряженности поля бесконечной равномерно заряженной нити?
7. Заряженный воздушный конденсатор: а) подключен к источнику ЭДС; б) отключен от него. В каком случае работа по раздвижению его пластин больше?
8. Скорость дрейфа электронов $\sim 0,1$ мм/с. Почему же при замыкании электрической цепи лампочка вспыхивает почти мгновенно даже на большом удалении от выключателя?
9. Если ток обусловлен направленным движением электронов проводника, возникнет ли он при направленном движении самого проводника или при резком его торможении?
10. Какая из ламп — в 100 и 60 Вт — светит ярче при их: а) параллельном; б) последовательном соединении?

Задачи с решениями

5.1. Никель-кадмиевый аккумулятор с ЭДС 2,5 В может развивать максимальную силу тока 16 А. Какую максимальную мощность может он отдавать сопротивлению нагрузки? Каков при этом КПД?

Дано: $\mathcal{E} = 2,5$ В; $I_{\max} = 16$ А.

$P_{\max} = ?$ $\eta = ?$

Решение. Мощность в нагрузке определяется выражением

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

где r и R — внутреннее сопротивление источника и сопротивление нагрузки соответственно. Максимальную мощность можно определить, взяв производную функ-

ции $P(R)$ и приравняв ее к нулю. В результате получим $R = r$. Поскольку вторая производная при этом отрицательна, найденный экстремум является максимумом.

Внутреннее сопротивление источника определяем из условия

$$I_{\max} = \frac{\mathcal{E}}{r}, \quad r = \frac{\mathcal{E}}{I_{\max}}.$$

Таким образом,

$$P_{\max} = \left(\frac{\mathcal{E}}{2r}\right)^2 r = \frac{\mathcal{E}I_{\max}}{4}.$$

Подставляя данные, получим $P_{\max} = 10$ Вт.

КПД определяется как отношение мощности, выделяемой в нагрузке, к полной мощности, выделяемой в цепи:

$$\eta = \frac{I^2 R}{I^2 (R + r)} = \frac{R}{R + r}.$$

Поскольку в данном случае $R = r$, получаем $\eta = 0,5$.

5.2. Электродетонатор сопротивлением 2,4 Ом срабатывает при взрывном токе не менее 1 А. Сколько таких детонаторов можно последовательно подключить к подрывной машинке, генератор которой обеспечивает ЭДС 290 В при внутреннем сопротивлении 10 Ом, если сапер находится на расстоянии 300 м от линии поражения? Саперный провод имеет сечение $0,75 \text{ мм}^2$, а его удельное сопротивление $1,9 \cdot 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Дано: $R_{\text{дет}} = 2,4 \text{ Ом}$; $I = 1 \text{ А}$; $\mathcal{E} = 290 \text{ В}$; $r = 10 \text{ Ом}$; $l = 300 \text{ м}$; $\rho = 1,9 \cdot 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $S = 0,75 \text{ мм}^2 = 7,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$.

$n = ?$

Решение. В соответствии с законом Ома

$$I = \frac{\mathcal{E}}{nR_{\text{дет}} + r + 2\rho l/S}.$$

Отсюда

$$n = \frac{S(\mathcal{E} - Ir) - 2I\rho l}{IR_{\text{дет}}S}.$$

Подставляя данные, получим $n = 110,3$ или, округляя, $n = 110$.

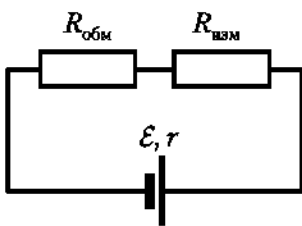


Рис. 5.11

5.3. В магнитоэлектрическом миллиамперметре шкала линейная, т.е. угол ϕ поворота стрелки, прикрепленной к его обмотке, находящейся в магнитном поле, пропорционален току. Чтобы сделать из него омметр, нужно последовательно с обмоткой включать измеряемые резисторы и подавать на это последовательное соединение одно и то же постоянное напряжение, например от батареи питания (рис. 5.11). Будет ли шкала омметра линейной?

Решение. В соответствии с законом Ома ток в цепи, показанной на рис. 5.11, равен

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{изм}} + R_{\text{обм}} + r},$$

где \mathcal{E} — ЭДС; $R_{\text{изм}}$ — сопротивление измеряемого резистора; $R_{\text{обм}}$ — сопротивление обмотки; r — внутреннее сопротивление источника тока. Как следует из этой формулы, зависимость $I(R_{\text{изм}})$ нелинейна. Следовательно, и зависимость $\phi(R_{\text{изм}})$ нелинейна.

5.4. В системе зажигания автомобиля конденсатор емкостью 0,25 мкФ с пробивным напряжением 300 В вышел из строя. Как заменить его конденсаторами емкостью 0,3 мкФ с пробивным напряжением 150 В?

Дано: $C = 0,25$ мкФ; $U = 300$ В; $C_1 = 0,3$ мкФ; $U_1 = 150$ В.

Решение. Для того чтобы обеспечить вдвое большее пробивное напряжение, конденсаторы нужно соединить последовательно. При этом два конденсатора дадут емкость 0,15 мкФ, а три — 0,1 мкФ. Эти две батареи следует соединить параллельно.

5.5. Миллиамперметр, имеющий сопротивление 0,5 Ом, рассчитан на измерение токов 0—15 мА. Какое сопротивление и каким образом нужно к нему подключить, чтобы он мог измерять: напряжение 0—150 В; ток 0—0,15 А?

Дано: $r = 0,5$ Ом; $I_{\max} = 15$ мА; $U = 150$ В; $I = 0,15$ А.

$R_{\text{доб}} = ?$ $R_{\text{шунт}} = ?$

Решение. Максимально возможное напряжение на миллиамперметре $U_{\max} = I_{\max} r$.

При необходимости измерять большее напряжение оставшее напряжение должно падать на последовательно подключенном добавочном сопротивлении.

Отсюда

$$R_{\text{доб}} = \frac{U - I_{\max} r}{I_{\max}}$$

При необходимости измерять большие токи разность между измеряемым током и допустимым для миллиамперметра должна протекать по параллельно включенному шунту. Отсюда

$$R_{\text{шунт}} = \frac{U_{\max}}{I - I_{\max}}$$

Подставляя данные, получим $R_{\text{доб}} = \sim 10$ кОм, $R_{\text{шунт}} = 5,46 \cdot 10^{-2}$ Ом.

Задачи для самостоятельного решения

5.6. Плоский слюдяной конденсатор с площадью обкладки 10 см² и толщиной слюды 0,5 мм заряжен до напряжения 300 В. Какая теплота выделится в резисторе, если его подключить к конденсатору?

5.7. Электрон влетает в плоский отклоняющий конденсатор электронно-лучевой трубки со скоростью $5 \cdot 10^6$ м/с посередине между пластинами длиной 3 см. Расстояние между ними 2 см. Каково максимально допустимое напряжение между пластинами, обеспечивающее вылет электрона из отклоняющей системы?

5.8. Запуск автомобильного стартера СТ230 током 300 А производится от аккумуляторной батареи 6СТ-90 с ЭДС 12 В и внутренним сопротивлением $8 \cdot 10^{-3}$ Ом. Сопротивление соединительных проводов $4 \cdot 10^{-3}$ Ом. Каков КПД системы пуска?

5.9. Источник напряжения 950—1000 В, подключенный к ускоряющему электроду электронно-лучевой трубки осциллографа, имеет внутреннее сопротивление 5 кОм. При поиске неисправности вольтметром с внутренним сопротивлением 10 кОм измерили на ускоряющем электроде напряжение 640 В. Исправен ли источник?

5.10. На резистор сопротивлением 100 Ом поступает периодическая последовательность прямоугольных импульсов напряжения частотой 2 кГц, амплитудой 50 В, длительностью 5 мкс. На какую мощность рассеивания должен быть рассчитан резистор?

Глава 6

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Идея — это мираж, схваченный на живую нитку Ариадны.

В результате изучения данной главы учащийся должен:

знать

- физическую сущность характеристик магнитного поля и описывающих его законов;
- теоремы для потока и циркуляции вектора \mathbf{B} ;
- сходства и различия магнитного и электростатического полей;
- ток смещения;
- уравнения Максвелла и их роль в развитии теории электромагнитного поля;
- законы электромагнитной индукции в различных ее проявлениях;
- возможности и особенности применения законов электромагнетизма при исследовании объектов техники и вооружения;

уметь

- распознавать, вычленять и анализировать проявления закономерностей электростатики и электродинамики в изучаемых объектах природы и техники;
- формулировать изучаемую военно-техническую задачу с позиций законов электродинамики и применять аппарат теории для ее решения;

владеть

- навыками применения законов электродинамики при исследовании военно-технических задач, сформулированных как физические;
 - навыками привлечения физических констант, справочных данных, оценки порядка величин и опоры на их размерности при решении задач электродинамики.
-

6.1. Магнитное поле. Закон Био — Савара — Лапласа

Что именно движет магнитной стрелкой, оставалось тайной до работы английского физика У. Гильберта, опубликованной в 1600 г. Были предположения, что стрелку притягивает Полярная звезда, огромная магнитная гора на Северном полюсе и т.п. Гильберт изготовил из магнетита (природного магнитного минерала) шар и убедился, что магнитная стрелка поворачивается относительно него так же, как относительно Земли. Это привело его к выводу, что именно Земля является магнитом, действующим на стрелку.

Тем удивительнее было новое открытие — датский физик Х. К. Эрстед в 1820 г. обнаружил действие на магнитную стрелку *электрического тока*. Оно кажется удивительным и сейчас, хотя уже по иным причинам. Во-первых, *механическое* движение зарядов порождает здесь силу совершенно иной природы. Во-вторых, если перейти в систему отсчета, связанную с на-

правленно движущимися зарядами, то они окажутся *неподвижными* и магнитное поле исчезнет! Из этого следует, что магнитное поле — чисто релятивистский эффект, но это лишь усугубляет его странность: релятивистские эффекты возникают при $v \rightarrow c$, а скорость дрейфа электронов много меньше скорости черепахи ($\sim 10^{-4}$ м/с)!

Почему же проявляются столь ничтожные силы? Дело в том, что они умножаются *колоссальным количеством* зарядов и не «заслоняются» кулоновскими силами из-за *нейтральности проводника*.

Совокупность магнитных сил определяется **магнитным полем**. Его силовая характеристика — **индукция магнитного поля** (или магнитная индукция), которая обозначается вектором \mathbf{B} и измеряется в **теслах** (Тл) — в честь сербского ученого Н. Тесла (1856—1943). Как установили М. Фарадей и Х. А. Лоренц, магнитные силы, в отличие от электростатических, зависят не только от зарядов и расстояния между ними, но и от их скоростей. Как и всякие силы, магнитные силы — это плод *взаимодействия*: движущиеся заряды и создают поле, и испытывают его действие. Рассмотрим первую сторону взаимодействия.

Заряд q , движущийся со скоростью \mathbf{v} , создает в точке A магнитное поле с индукцией \mathbf{B} (рис. 6.1, а), которая по мере движения заряда изменяется. Это следует хотя бы из того, что при $r \rightarrow \infty$ $B \rightarrow 0$. Поэтому оказывается проще рассчитывать магнитное поле, созданное *проводником с током*: пространственное положение зарядов в нем неизменно (*квазистационарно*), и любой элемент $d\mathbf{l}$ проводника вносит в индукцию \mathbf{B} в точке A один и тот же вклад $d\mathbf{B}$ (рис. 6.1, б). Его определяет закон, названный именами трех ученых, — **закон Био — Савара — Лапласа**:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\mathbf{l}, \mathbf{r}]}{r^3}. \quad (6.1)$$

Здесь $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — **магнитная постоянная** (Гн (генри) — единица индуктивности). Предполагается, что проводник тонкий, и потому направление тока параллельно вектору $d\mathbf{l}$. Направление вектора $d\mathbf{B}$ определяется, как для любого векторного произведения, путем вращения головки правого винта от первого вектора ($d\mathbf{l}$) ко второму (\mathbf{r}). Здесь это правило модифицируют иногда следующим образом: *если жало правого винта переме-*

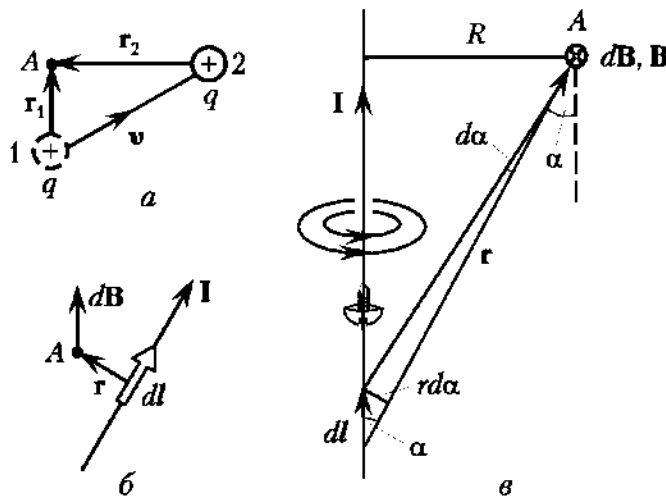


Рис. 6.1

щается в направлении тока, то вращение его головки указывает направление линий вектора \mathbf{B} .

Формула (6.1) самостоятельного значения не имеет, так как отдельных элементов $d\mathbf{l}$ с током не существует: они всегда входят в состав проводника макроскопической длины. Отсюда возникает задача интегрирования выражения (6.1) по всей длине проводника на основе **принципа суперпозиции**. Если, например, бесконечный прямой провод с током лежит в плоскости чертежа (рис. 6.1, θ), то в какой-то точке A векторы $d\mathbf{B}$, обусловленные токами во всех элементах $d\mathbf{l}$, имеют направление «от нас». Поэтому туда же направлен результирующий вектор \mathbf{B} , а его модуль равен алгебраической сумме dB :

$$dB = \frac{\mu_0 I(dl)\sin\alpha}{4\pi r^2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} \sin\alpha d\alpha,$$

где α — угол между векторами $d\mathbf{l}$ и \mathbf{r} и использованы соотношения $(dl)\sin\alpha = r d\alpha$, $r = R/\sin\alpha$ (см. рис. 6.1, θ). Поскольку для бесконечно длинного прямолинейного провода угол α изменяется в пределах от 0 до π , то сложение векторов $d\mathbf{B}$ сводится к интегрированию по углу в соответствующих пределах:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} \int_0^\pi \sin\alpha d\alpha = \frac{\mu_0 2I}{4\pi R}. \quad (6.2)$$

Отсюда $B = \text{const}$ для всех точек пространства, находящихся на расстоянии R от провода. Следовательно, линии индукции (силовые линии магнитного поля) имеют вид **концентрических окружностей** (см. рис. 6.1, θ). Как и для электростатического поля, их густота отражает величину модуля B , а направление вектора \mathbf{B} совпадает с касательной к силовой линии.

6.2. Теорема Гаусса и циркуляция вектора \mathbf{B}

Магнитное поле, созданное одним прямолинейным током, — явление редкое. В жидком ядре Земли, в электродвигателях, отклоняющих системах электронно-лучевых трубок и т.д. токи имеют более сложные конфигурации. Как и при расчете электростатических полей, использовать принцип суперпозиции в таких случаях бывает сложно, и потому прибегают к свойствам потока и циркуляции вектора \mathbf{B} .

Элементарный поток вектора \mathbf{B} через площадку $d\mathbf{S}$ определяется, как и для других векторов (см. параграф 5.2):

$$\Phi_B = \mathbf{B}d\mathbf{S} = B(\cos\alpha)dS = B_n dS. \quad (6.3)$$

Отсюда определяется единица **потока магнитной индукции** (или **магнитного потока**), которая называется **вебер** (Вб) — в честь немецкого физика В. Э. Вебера (1804—1891): $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$. Существенное отличие Φ_B от Φ_E состоит в том, что линии вектора \mathbf{B} всегда замкнуты, поскольку не имеют никаких источников или стоков, что связано с отсутствием в природе магнитных зарядов.

ВОПРОС. Чему равен поток вектора \mathbf{B} через замкнутую поверхность?

ОТВЕТ. Результат получен при рассмотрении электростатического поля (см. параграф 5.2). Если линии поля в объеме не исчезают и не возникают, то он всегда равен нулю.

В этом и состоит теорема Гаусса для вектора \mathbf{B} : *поток вектора \mathbf{B} через любую замкнутую поверхность равен нулю:*

$$\oint_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0. \quad (6.4)$$

Для определения *циркуляции* вектора \mathbf{B} (см. параграф 5.3) мысленно проведем окружность L_1 в плоскости чертежа, через центр которой по бесконечно длинному прямому проводу течет ток I «от нас» (рис. 6.2). Поскольку направление обхода контура (пунктирная стрелка) совпадает с направлением линии вектора \mathbf{B} , то $\mathbf{B}dl = Bdl = \mu_0 I d\alpha / (2\pi)$, где использовано равенство (6.2) и учтено соотношение $dl = R d\alpha$. Следовательно,

$$\oint_L \mathbf{B} dl = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\alpha = \mu_0 I. \quad (6.5)$$

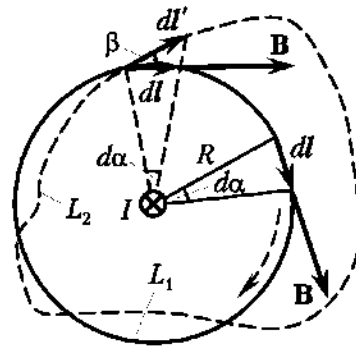


Рис. 6.2

Для *произвольного* контура L_2 (см. рис. 6.2) $\mathbf{B}dl' = B(dl')\cos\beta = Bdl$, и потому выражение (6.5) остается в силе. Если при том же направлении обхода контура ток имеет *обратное* направление, то $\mathbf{B}dl = -Bdl$, т.е. I в правой части выражения (6.5) — величина алгебраическая. Отсюда следует, что $I > 0$, если направления тока и обхода контура связаны правилом правого винта. Если ток проходит *вне площади*, охваченной контуром, то нетрудно показать, что циркуляция равна нулю. Если же контур охватывает *несколько токов*, то в соответствии с принципом суперпозиции

$$\oint_L \mathbf{B} dl = \oint_L \left(\sum_{k=1}^n \mathbf{B}_k \right) dl = \sum_{k=1}^n \oint_L \mathbf{B}_k dl = \mu_0 \sum_{k=1}^n I_k \quad (6.6)$$

т.е. *циркуляция вектора \mathbf{B} по произвольному контуру равна алгебраической сумме охваченных им токов, умноженной на μ_0 .*

6.3. Сила Лоренца

Обратимся теперь ко второй стороне взаимодействия движущихся зарядов. Если в данной точке уже существует магнитное поле с индукцией \mathbf{B} , то на заряд q , движущийся со скоростью \mathbf{v} , в этой точке действует **сила Лоренца**

$$\mathbf{F}_L = q[\mathbf{v}, \mathbf{B}]. \quad (6.7)$$

Ее модуль $F = qvB\sin\alpha$, а направление определяется вращением рукоятки правого винта от первого вектора (\mathbf{v}) ко второму (\mathbf{B}). Практическая значимость силы Лоренца определяется формируемой ею траекторией движения заряда.

ВОПРОС. Какова траектория движения заряда, если, например, векторы \mathbf{v} и \mathbf{B} ортогональны?

ОТВЕТ. Сила, перпендикулярная скорости, выполняет роль центростремительной, поэтому заряд будет двигаться по окружности (рис. 6.3, а).

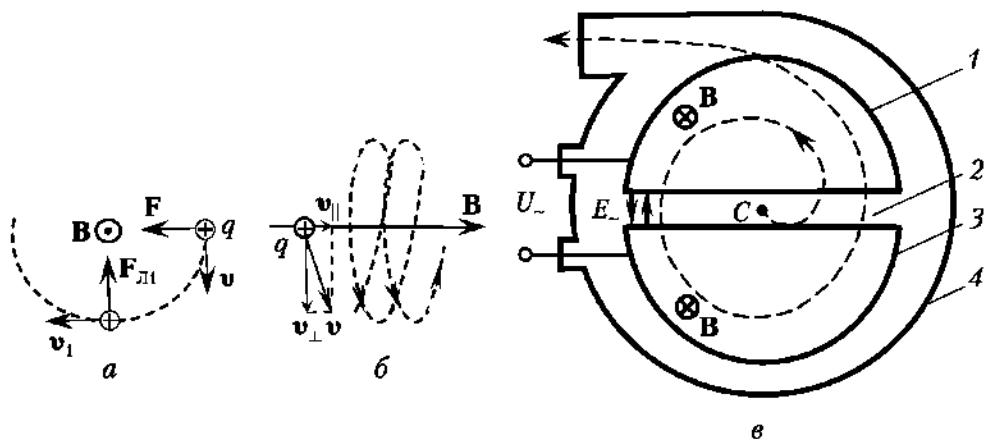


Рис. 6.3

ВОПРОС. Каков радиус этой окружности?

ОТВЕТ. Учитывая, что $\alpha = \pi/2$ и $qvB = mv^2/R$, получаем

$$R = \frac{mv}{qB}. \quad (6.8)$$

ВОПРОС. А какова траектория заряда при $\alpha \neq \pi/2$?

ОТВЕТ. Вектор \mathbf{v} можно разложить на составляющие — \mathbf{v}_{\parallel} , параллельную вектору \mathbf{B} , и \mathbf{v}_{\perp} , ортогональную к нему. В соответствии с формулой (6.7) первая составляющая к появлению силы Лоренца не приводит, а только перемещает заряд вдоль линии вектора \mathbf{B} , а вторая сводится к предыдущему случаю. Следовательно, заряд будет двигаться по винтовой линии (рис. 6.3, б). Такое движение изучают в лабораторном практикуме на базе электронно-лучевой трубки.

Уже одно это определяет жизненную важность силы Лоренца. Убийственные для живого космические частицы, попав в магнитосферу Земли, движутся по винтовым линиям. На удлинённом таким образом пути они растрачивают гораздо больше энергии на возбуждение и ионизацию молекул атмосферы, образуя разноцветные полярные сияния, повергавшие в ужас наших предков. В результате поверхности Земли достигают частицы, имеющие в основном относительно небольшие энергии, хотя есть и весьма «энергичные». Они вызывают мутации, онкологические заболевания, портят микросхемы и т.д.

С другой стороны, у развившегося в относительно защищённых условиях человека возникла потребность в частицах высоких энергий для исследования свойств вещества. В электростатическом поле разогнать их трудно, так как при приемлемых напряжениях линейный ускоритель получается слишком длинным, а более компактный требует напряжений $> 10^6$ В, которых не выдерживают конструкции. Диалектика такова, что сила Лоренца оказалась полезной и здесь.

Созданный в 1931 г. американским физиком Э. Лоуренсом (Нобелевская премия 1939 г.) циклотрон (рис. 6.3, в) содержит две половины (1 и 3) пустотелого металлического цилиндра (дуанты), разделённые узкой щелью 2

и помещенные в вакуумную камеру 4. Между дуантами создают переменное электрическое поле E_{\perp} , а внутри дуантов — перпендикулярное ему магнитное поле с индукцией \mathbf{B} . Положительные ионы из источника S под действием напряжения между дуантами попадают в один из них. Поскольку высота цилиндров мала, электрическое поле щели в них не проникает, но магнитное поле действует, поэтому ионы движутся *по окружности*, радиус которой определяется формулой (6.8), возвращаясь к щели 2. К этому времени вектор \mathbf{E} меняет направление на противоположное и сообщает им ускорение. Поскольку это происходит *многократно*, ускоряющее напряжение может быть относительно небольшим (присмы многократного локального умножения эффекта применяют и в других случаях, например при конструировании лазеров — см. параграф 10.1). После каждого ускорения в щели частицы движутся с увеличенным радиусом, т.е. по *раскручивающейся спирали*.

ВОПРОС. Каким должен быть период переменного напряжения между дуантами?

ОТВЕТ. Он определяется временем обращения иона по окружности $T = 2\pi R/v$. Учитывая формулу (6.8), получаем

$$T = \frac{2\pi m}{qB}. \quad (6.9)$$

Как видим, *период не зависит от скорости иона!* Правда, это справедливо лишь до тех значений скорости, при которых в соответствии с СТО масса иона и, соответственно, период (6.9) начинают возрастать. Из-за этого фаза пролета частицы через зазор начинает отставать от фазы переменного напряжения, вплоть до того, что частица начнет попадать даже в фазу тормозящего поля! При амплитуде ускоряющего напряжения 10^5 В предельные энергии для протона — 22 МэВ, а для электрона — 0,5 МэВ. Чтобы получить бóльшие энергии, в **фазотроне** постепенно увеличивают период переменного напряжения между дуантами, а в **синхротроне** синхронно с возрастанием массы увеличивают магнитную индукцию, чтобы обеспечить $m/B = \text{const}$. Ускоритель, совмещающий оба способа, называется **синхрофазотроном**. Впервые он был построен в Дубне в 1957 г.

Если первый циклотрон имел диаметр ~ 10 см, то современные ускорители — это гигантские сооружения («пирамиды XX века»), обеспечивающие энергии частиц до $\sim 10^{12}$ ГэВ. В последние годы внимание ученых приковано к Большому адронному коллайдеру (БАК), расположенному в международном центре ядерных исследований (ЦЕРН) на территории Швейцарии и Франции. Он представляет собой кольцевую трубу с длиной окружности ~ 27 км, в которой разгоняются встречные пучки частиц. К работе на БАК привлечены тысячи специалистов из разных стран мира.

Ускорители позволяют изучать структуру вещества, виды взаимодействий, но, помимо научного, имеют и прикладное значение.

Примеры практики

Пучками быстрых частиц обрабатывают материалы, изменяя их технологические и эксплуатационные свойства. Пучки ионов, внедренные в *полупроводники*, создают в них нужные примеси. В *медицине* ускорители применяют для лече-

ния опухолей, в *сельском хозяйстве* — для повыщения всхожести семян и т.д. Бурно развивается технология мембран — фильтров для разделения веществ. Пробив полимерную пленку, пучок ионов оставляет в ней отверстия, диаметр которых определен видом ионов. Такой *ядерный фильтр* обеспечивает тончайшие разделения молекул в смесях газов и жидкостей. Наконец, ускорители являются основой так называемого *пучкового оружия* в системах противоракетной обороны.

Силу Лоренца применяют и в **трековых приборах** — устройствах для идентификации частиц (от англ. *track* — след). Пролетая через вещество, частица ионизирует молекулы, около цепочки ионов формируется видимая траектория, а по ее искривлению в магнитном поле определяют q/m — *удельный заряд* частицы. Так работают **камера Вильсона**, в которой используют *пересыщенный пар*, и **пузырьковая камера**, использующая *перегретую жидкость* (см. параграф 4.9). Тот же принцип применяют и в **масс-спектрометрах**, с помощью которых исследуют состав вещества (наука, техника, технологии, экология, криминалистика и т.д.). Пробу вещества ионизируют, образовавшиеся ионы ускоряют в электрическом поле и направляют в область магнитного поля. Масс-спектрометры используют для анализа атмосферы Земли и других планет, почвы Луны, Марса, комет, воздуха в подводных лодках и космических кораблях, отработавших газов автомобиля и т.д.

Силу Лоренца применяют и для последовательного отклонения (построчного сканирования) электронного луча, проходящего по экрану устройства отображения информации (мониторы компьютеров, станций наведения ракет, приборов ночного видения, телевизионных передатчиков и приемников). В передающей телевизионной трубке сканирующий электронный луч считывает с экрана оптическое изображение объектов, в том числе труднодоступных, находящихся в космосе, под водой, в зоне ядерного взрыва и т.д. Синхронный с ним сканирующий луч приемной трубки воспроизводит эту информацию (сейчас для этих целей чаще используют особые полупроводниковые матрицы — см. параграф 10.9). В подвижных средствах, например крылатых ракетах, телевидение применяют для совмещения видимой картины цели с находящейся в памяти бортовой ЭВМ, что обеспечивает высокую точность наведения ракет (порядка нескольких метров).

На рис. 6.4 показана схема эффекта Холла, открытого американским физиком Э. Холлом в 1879 г. Индукция \mathbf{B} магнитного поля перпендикулярна направлению плотности тока \mathbf{j} в проводнике. Под действием силы Лоренца свободные носители, имеющие заряд q и концентрацию n , смещаются в плоскости поперечного сечения проводника, формируя собственное электрическое поле.

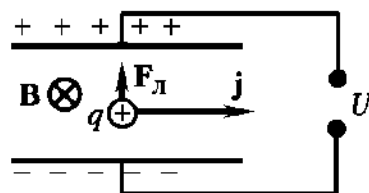


Рис. 6.4

ВОПРОС. Какое поперечное напряжение U установится между боковыми поверхностями проводника, если расстояние между ними d ?

ОТВЕТ. В установившемся режиме сила, действующая на заряд со стороны поперечного электрического поля, уравнивает силу Лоренца, т.е. $qE = qvB$. Подставляя соотношения $E = U/d$ и $v = j/nq$, получаем

$$U = \frac{djB}{nq}.$$

Эта формула является инструментом для анализа самых разных датных. Она позволяет определять концентрацию и знак заряда носителей тока, индукцию магнитного поля и т.д. На ее основе конструируют и широко применяемые датчики Холла.

Разместим между датчиком Холла и магнитом вращающийся диск из ферромагнитного материала, имеющий прорези. Когда между датчиком и магнитом оказывается прорезь, между его боковыми гранями возникает напряжение, а когда ферромагнетик находится между прорезями, напряжение исчезает. Такие импульсы могут далее поступать на различные преобразователи. Так построена, например, система зажигания в некоторых ДВС. Так контролируют и угловую скорость ротора двигателя, определяющую скорость движения боевого катера. При определенном ее значении за обводы днища автоматически выдвигаются так называемые интерцепторы. Они формируют воздушную каверну, снижающую гидродинамическое сопротивление корпуса судна, его скорость резко возрастает и сохраняется при значительном волнении.

Датчик Холла позволяет бесконтактным способом измерять постоянный, переменный и импульсный токи. Ток, протекающий через контролируемый проводник, создает пропорциональное силе тока магнитное поле, воздействующее на датчик Холла, а тот вырабатывает соответствующий сигнал.

На основе эффекта Холла созданы датчики перемещения, измерители частоты вращения, электронные компасы, бесконтактные переключатели, бесколлекторные электродвигатели постоянного тока и т.д.

Представим теперь, что между пластинами на рис. 6.4 движется *плазма*. В ней возникает тот же эффект, и если пластины соединить друг с другом через потребитель электроэнергии, то через него потечет ток. В работающем таким образом **магнитогазодинамическом генераторе** (МГД-генератор) плазму получают из газообразных продуктов сгорания топлива с легкоионизируемыми добавками (пары щелочных металлов). МГД-генератор преобразует тепловую энергию в электрическую *без промежуточных устройств* (например, паровых турбин), что повышает КПД на 20–25%.

6.4. Сила Ампера

Под действием силы Лоренца носители тока проводника получают импульсы и передают их его кристаллической решетке. Поэтому проводник смещается *как целое*.

Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, называется **силой Ампера**.

На элемент dl однородного проводника сечением S при концентрации n носителей тока действует сила Ампера

$$dF = qnSdlBv\sin\alpha = IdlB\sin\alpha,$$

где α — угол между направлениями тока и вектора \mathbf{B} . В векторной форме имеем

$$dF = I[dl, \mathbf{B}]. \quad (6.10)$$

Направление силы Ампера, естественно, то же, что и силы Лоренца (силу Ампера, действующую на прямолинейный проводник с током, изучают в лабораторном практикуме). Если проводник с током не прямолинейен, то на разных его участках из-за разных углов α направления силы Ампера различны. Пример, представляющий практическую важность, — *контур с током* в магнитном поле. В положении, показанном на рис. 6.5, *a*, на стороны AE и CD сила Ампера не действует ($\alpha = 0$), а на стороны AC и ED действует пара сил $F_{AC} = F_{ED} = IbB$, создающая момент $\mathbf{M} = [\mathbf{a}, \mathbf{F}_{ED}]$, $M = aF_{ED}\sin\alpha = abIB\sin\alpha$. Произведение $Iab = IS$ — это модуль векторной характеристики контура с током, которую называют **магнитным моментом** \mathbf{p}_m . Направление вектора \mathbf{p}_m определяют **правилом правого винта**: если головку винта вращать в направлении тока в контуре, то жало винта перемещается в направлении вектора \mathbf{p}_m :

$$\mathbf{p}_m = IS\mathbf{n}, \quad (6.11)$$

где \mathbf{n} — единичная нормаль к плоскости, охваченной контуром. Пользуясь формулой (6.11), получим $M = p_m B \sin\alpha$ (рис. 6.5, *б*), что позволяет представить вектор \mathbf{M} в виде

$$\mathbf{M} = [\mathbf{p}_m, \mathbf{B}]. \quad (6.12)$$

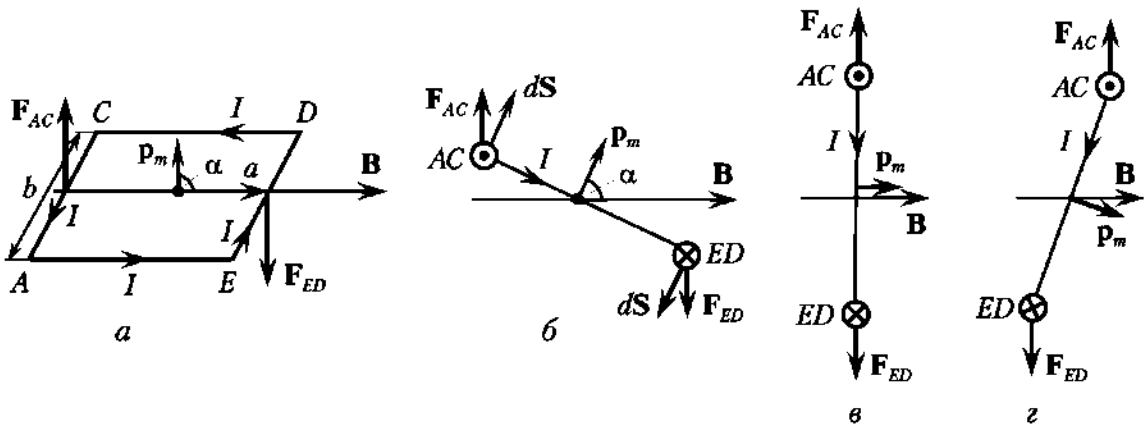


Рис. 6.5

Формула (6.12) справедлива для контура *любой формы*, который можно представить как совокупность прямоугольных. Из рис. 6.5, *б—г*, где стороны AC и ED перпендикулярны плоскости эскиза, нетрудно видеть, что при достижении $\alpha = 0$ остаются лишь силы, растягивающие контур. Если же контур по инерции «проскочит» это положение, то возникнет пара сил, возвращающая к нему (см. рис. 6.5, *г*). Все это лежит в основе работы измерительных приборов *магнитоэлектрической системы*. В соответствии с формулами (6.11), (6.12) силу тока можно определить путем измерения вращающего момента. Его, в свою очередь, определяют с помощью равного ему противо-

действующего момента упругих сил $M_{\text{упр}} = k\alpha$ (рис. 6.6), где α — угол поворота контура (рамки), расположенного между полюсами магнита N и S ; k — коэффициент, характеризующий упругие свойства пружины или нити. Для повышения чувствительности прибора применяют несколько контуров (рамку), тогда их моменты складываются. При $M = M_{\text{упр}}$, учитывая формулы (6.11), (6.12), получаем

$$I = [(k/(SB))]\alpha,$$

т.е. измеряемый ток пропорционален углу поворота рамки.

Описанный прибор представляет собой *миллиамперметр*, который с помощью шунтов и добавочных сопротивлений легко превратить в *вольтметр*, *омметр* или даже измеритель неэлектрических величин: с помощью датчиков-преобразователей они превращаются в электрические. Приборные доски самолетов, подводных лодок, систем ПВО, автобронетанковой техники содержат массу измерительных приборов, а часть измерений отдают в ведение ЭВМ (в современных измерительных приборах чаще используют цифровую технику).

Весьма распространенное применение формулы (6.12) — **электродвигатель**, преобразующий электрическую энергию тока в механическую. Для решения проблемы $\alpha = 0$ в момент прохождения рамкой положения равновесия направление тока изменяют на противоположное с помощью коллектора 1 и контактных щеток 2, соединяющих рамку с источником тока (рис. 6.7).

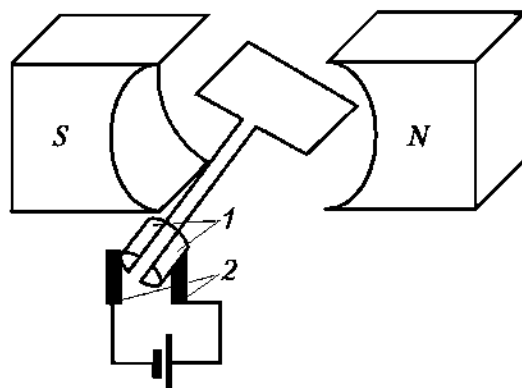


Рис. 6.7

Первую лабораторную модель электродвигателя постоянного тока создал все тот же М. Фарадей. Реальный электродвигатель имеет множество рамок, распределенных по *якорю* — вращающейся части двигателя. Соответственно, и *статор* имеет множество магнитных полюсов. В современной технике применяют как мощные электродвигатели (до $\sim 10^6$ Вт), так и двигатели размером со спичечную головку, как, например, в мобильном телефоне, где он снабжен эксцентриком и вырабатывает вибрационный звуковой сигнал. В одном только автомобиле электродвигатели обеспечивают пуск ДВС, работу стеклоочистителя и вентилятора, переключение редуктора заднего моста, передвижение сиденья водителя, а в электромобиле электродвигатели непосредственно вращают его колеса. Особое место занимают линейные электродвигатели, имеющие отношение к кинетическому оружию.

Историческая справка

В 1834 г. русский ученый Б. С. Якоби построил первую действующую модель линейного электродвигателя для транспорта. В 1895 г. австрийский инженер Ф. Гефт предложил с помощью такого двигателя (ствола-соленоида) запускать корабли на Луну, а норвежский изобретатель К. Брикланд «опустил» эту идею на Землю, предложив использовать подобную пушку в военных целях (1901 г.). В 1915 г. русские инженеры Н. Подольский и М. Ямпольский превратили эти полуфантастические идеи в конкретный проект, рассчитанный на дальность выстрела 300 км. В реализации проекта им отказали, но, как это бывает с российскими идеями, ее реализовали на Западе. Во Франции через год была создана работающая модель. Она разгоняла снаряд массой 50 г до скорости в 200 м/с, однако только в 1980-е гг. разработка электромагнитного оружия стала перспективной. Теперь его рассматривают как одно из ведущих оружейных направлений XXI в. Такие пушки устанавливают уже на танки и корабли и предполагают использовать в составе космического оружия систем ПРО.

Примеры практики

Схема действия простейшей электромагнитной пушки показана на рис. 6.8. По неподвижным параллельным рельсам 1 через контактирующий с ними подвижный снаряд 2 пропускают большой ток.

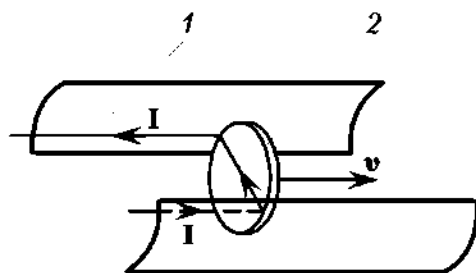


Рис. 6.8

Как следует из рисунка, направление индукции магнитного поля, создаваемого рельсами, и направление тока через снаряд таковы, что сила Ампера действует на снаряд вдоль рельсов.

Такая пушка за доли секунды разгоняет боеприпас до скоростей $\sim 10^4$ – 10^5 км/ч с кинетической энергией $\sim 10^7$ – 10^8 Дж и дальностью полета $\sim 10^3$ км.

Преимущества подобного оружия – отсутствие толстого ствола (нет поперечного давления), огня, дыма и звука; долговечность (нет высоких температур); безопасное хранение снарядов (нет взрывчатых веществ); дальнобойность. Недостаток один, но существенный: для эффективного выстрела нужны миллионы киловатт электроэнергии.

6.5. Магнитное поле в веществе

Поскольку движение электронов вокруг ядра эквивалентно контуру с током, это дает ключ к пониманию магнитных свойств вещества. Каждый электрон атома своим движением вокруг ядра создает контур с током, а векторная сумма их магнитных моментов \mathbf{p}_m определяет **магнитный момент атома**. Магнитные моменты атомов ведут себя аналогично дипольным моментам диэлектрика (см. параграф 5.6): в естественном состоянии вещества их направления *хаотичны*, а при появлении внешнего магнитного поля они ориентируются по вектору его индукции.

В отношении магнитных свойств вещества называют **магнетиками**, а их магнитное состояние характеризуют **намагниченностью**. На рис. 6.9 в одном из сечений магнетика показаны молекулярные токи, ориентированные магнитным полем. Как видим, в *объеме* материала они друг друга компенсируют, что аналогично компенсации зарядов диполей, и точно так же на *поверхности* магнетика компенсация отсутствует: молекулярные токи как бы продолжают друг друга, образуя кольцевой ток намагничивания (идея о таких токах принадлежит Амперу). Его отличие от тока проводимости в том, что он состоит из отдельных фрагментов, в которых носители тока *связаны в* молекулах. Ток намагничивания создаст собственное магнитное поле с индукцией \mathbf{V}' , которое по принципу суперпозиции складывается с индукцией внешнего поля. Результирующую индукцию в магнетике можно представить в виде

$$\mathbf{V} = \mu \mathbf{V}_0, \quad (6.13)$$

где μ — магнитная проницаемость вещества.

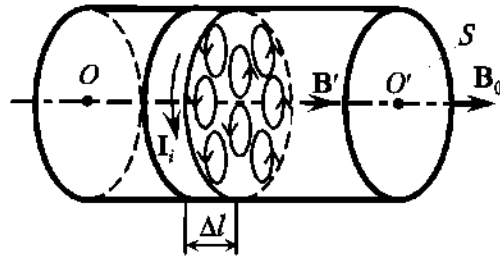


Рис. 6.9

Магнитная проницаемость показывает, во сколько раз возрастает индукция магнитного поля при заполнении пространства магнетиком.

Поскольку циркуляция (6.6) вектора \mathbf{V} при тех же *токах проводимости* I_k зависит и от магнитных свойств вещества, здесь поступают так же, как при анализе электростатического поля при наличии диэлектрика, — вводят еще одну силовую характеристику, которая исключает влияние вещества, — вектор **напряженности \mathbf{H}** магнитного поля:

$$\mathbf{V} = \mu \mu_0 \mathbf{H}. \quad (6.14)$$

Вектор \mathbf{H} позволяет представить циркуляцию (6.6) в виде, зависящим уже только от токов проводимости:

$$\oint_L \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum_{k=1}^n I_k. \quad (6.15)$$

Как следует из формулы (6.15), единицей измерения H является **ампер на метр** (А/м). Аналогом вектора \mathbf{H} в электростатическом поле является вектор электростатической индукции (смещения) \mathbf{D} , поток которого также не зависит от свойств среды, а определяется только *свободными* зарядами.

Магнетики, атомы которых имеют *собственный магнитный момент*, называются **парамагнетиками** (кислород, оксид азота, водные растворы некоторых солей, алюминий, марганец и т.д.). Вообще говоря, магнитный момент атома определяется не только орбитальным движением электронов, но и их *собственным магнитным моментом*, который называется **спином** (см. параграф 9.9). Парамагнетики аналогичны полярным диэлектрикам.

В отличие от парамагнетика, у атомов **диамагнетика** сумма орбитальных и спиновых магнитных моментов равна нулю (инертные газы, ряд органических соединений, золото, медь, цинк и т.д.). Под действием внешнего магнитного поля этот баланс нарушается, а возникшие магнитные моменты атомов ориентируются *противоположно* вектору \mathbf{B}_0 . В этом отношении диамагнетики аналогичны неполярным диэлектрикам, которые поляризуются под действием внешнего электрического поля, и их дипольные моменты противоположны вектору его напряженности (см. параграф 5.6). Теорию диамагнетизма разработали советские теоретики Л. Д. Ландау (1908–1968, Нобелевская премия 1962 г.) и Е. М. Лифшиц (1915–1985). В неоднородном поле диамагнетики *выталкиваются* из области более сильного поля, что используют, например, при решении проблем управляемого термоядерного синтеза (см. параграфы 2.5, 5.9).

На установках типа «Токамак» термоядерную плазму создают в тороиде, находящемся в сильном неоднородном магнитном поле. Оно создает вокруг тороида магнитную пробку: плазма удерживается в той области поля, где его индукция меньше. Инициаторами таких идей и конструкций были советские физики И. Е. Тамм (1895–1971), А. Д. Сахаров (1921–1989), а также американский астрофизик Л. Спитцер (1914–1997). После ряда положительных результатов, полученных в СССР, США и других странах, в настоящее время во Франции строится огромный международный термоядерный экспериментальный реактор (ИТЭР). Основные проблемы управляемого термоядерного синтеза — это неустойчивости плазмы и разрушение тороидальной оболочки.

У некоторых веществ взаимодействие соседних атомов приводит к *суммированию спинов электронов* в областях размером до 10^{-2} мм с *большим собственным магнитным моментом*. Эти области называют **доменами**. По своим свойствам ферромагнетик аналогичен сегнетоэлектрику, который также имеет домены, только не намагниченные, а поляризованные (см. параграф 5.6). Поскольку типичным представителем подобных магнетиков является железо, все они называются ферромагнетиками. Теорию ферромагнетизма разработали советские теоретики Я. И. Френкель (1894–1952), Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц.

В отсутствие внешнего магнитного поля домены ферромагнетика ориентированы произвольно и намагниченность отсутствует. Во внешнем магнитном поле возрастает объем тех доменов, момент которых случайно совпал по направлению с индукцией внешнего поля, а остальные переориентируются, подобно молекулам парамагнетика.

Ферромагнетик намагничивается весьма сильно: если у парамагнетиков $\mu \approx 1$, то у ферромагнетиков $\mu \approx 10^{10} \div 10^{11}$. В результате смещения границ между доменами и их поворота возникает сопутствующее явление — размеры ферромагнетика изменяются (сравните с пьезоэффектом). Такая деформация называется **магнитострикцией**. Обратный эффект состоит в том, что при деформации ферромагнетика он намагничивается (а сегнетоэлектрик поляризуется). При критической температуре T_c , которую называют **точкой Кюри**, спиновые связи соседних атомов разрушаются, домены распадаются и ферромагнетик превращается в парамагнетик (фазовый переход). Для железа $T_c = 768^\circ\text{C}$.

Зависимость намагниченности ферромагнетика от напряженности внешнего поля показана на рис. 6.10. Как видим, она нелинейна. При некоторых значениях H намагниченность M достигает *насыщения*, так как несоориентированных доменов не остается.

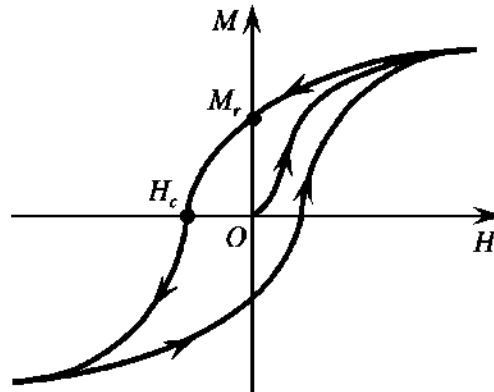


Рис. 6.10

Если уменьшать напряженность внешнего магнитного поля, то у ферромагнетика наблюдается **гистерезис**: кривая размагничивания выше кривой намагничивания, и потому при $H = 0$ сохраняется некоторая *остаточная намагниченность* M_r (см. параграф 5.6). Для ее ликвидации нужно изменить направление напряженности внешнего поля на обратное и достичь значения H_c . Его называют **коэрцитивной силой** (еще одно неудачное название, так как это не сила). Петля гистерезиса такова, что при одном и том же значении H нельзя *однозначно* определить намагниченность, а значит, и магнитную проницаемость ферромагнетика. Площадь петли гистерезиса пропорциональна энергии полного цикла персмагничивания, и у разных ферромагнетиков эти площади различны. Такой же гистерезис наблюдается у сегнетоэлектриков.

Вследствие больших значений μ ферромагнетика многократно увеличивают магнитную индукцию, поэтому в электромагнитах применяют *ферромагнитные сердечники* (что предлагал еще Ампер). В *неоднородном* магнитном поле *ферромагнетик вытягивается в область более сильного поля*, что используют в электромагнитных подъемных кранах, муфтах сцепления, стартерах, магнитном инструменте, зуммерах и т.д. Вытягивание ферромагнитного сердечника в соленоид с током используют для *измерения переменного тока и напряжения в приборах электромагнитной системы*.

Электромагнит применяют, например, в реле, схема которого показана на рис. 6.11. Когда управляющий сигнал замыкает цепь питания катушки (условно — ключ К), электромагнит притягивает якорь 1, и он замыкает или размыкает один или несколько контактов 2 — в комбинациях, которые

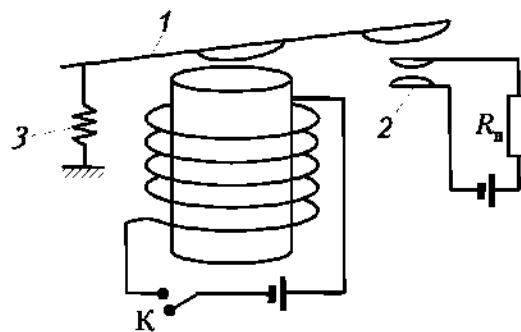


Рис. 6.11

позволяют получить тот или иной суммарный эффект в коммутируемых цепях. После отключения управляющего напряжения пружина \mathcal{J} возвращает якорь в исходное положение.

Одна из задач реле — преобразовать слабый сигнал датчика в сильные сигналы, управляющие исполнительными механизмами (термин «реле» возник от англ. *relay*, означающего смену уставших почтовых лошадей или передачу эстафеты спортсменом). Нагрузками реле служат нагреватели, электродвигатели, лампы накаливания и т.д. (раньше их широко применяли и в цифровых вычислительных машинах). К электромагнитным реле относится и герметичный магнитоуправляемый контакт (геркон) — пара упругих ферромагнитных пластин, запаянных в герметичную стеклянную колбу. Оказавшись в магнитном поле, они замыкаются.

Примеры практики

Некоторые взрыватели также можно рассматривать как вариант электромагнитного реле. Магнитное поле Земли весьма слабо ($H \sim 40$ А/м), но играет важную роль (его изучают в лабораторном практикуме). Его достаточно, чтобы, например, ориентировать стрелку компаса по магнитному меридиану. Поскольку ферромагнетик его концентрирует и усиливает, стрелка компаса вблизи него отклоняется, что мешает навигации. Точно так же реагирует поворотный механизм магнитной мины на массивный корабль. Такая мина, в отличие от якорной, незаметно лежит на дне, не поддаваясь обычному тралению. Это обнаружилось летом 1941 г.: с промежутком в два часа в устье Финского залива подорвался эсминец «Гневный», а затем и крейсер «Максим Горький». Советские физики под руководством А. П. Александрова (1903–1994) и Б. А. Гаева (1905–1974) нашли способ размагничивания корпуса корабля с помощью специальных обмоток, через которые пропускали постоянный ток. Такая система компенсировала магнитное поле корабля и хорошо себя зарекомендовала на практике. Масса танка много меньше, чем корабля, но и его магнитное поле способно дистанционно подорвать мину.

Поскольку ферромагнетик *концентрирует в себе магнитное поле*, его используют как магнитопровод в трансформаторах, якорях генераторов и других индукционных приборах, где он работает в режиме частого перемагничивания. Поскольку оно является не целью, а *средством* передачи магнитного потока, потери энергии на само перемагничивание должны быть минимальны, т.е. петля гистерезиса должна быть как можно уже. Такие ферромагнетики называются **магнитно-мягкими**. К ним относится, например, трансформаторное железо (сплав железа с кремнием), аморфные ферромагнетики (металлические стекла) и т.д.

Наличие у ферромагнетиков «памяти» пребывания в магнитном поле в виде остаточного намагничивания M_r используют для изготовления *постоянных магнитов*, которые должны иметь большие значения M_r и H_c . Такие **магнитно-жесткие** материалы делают из сплавов на основе Fe, Co, Ni, Al. Их широко применяют в электротехнике, радиотехнике и автоматике — для создания магнитного поля в воздушных зазорах измерительных приборов, электрогенераторов, электродвигателей и т.д. На транспорте, например, на их основе создают *магнитную подвеску*. Отсутствие контакта с рельсами обеспечивает таким поездам меньшие затраты энергии, высокую скорость (> 500 км/ч) и отсутствие шума.

1. Если пленку с ферромагнитным порошком протягивать сквозь область переменного магнитного поля, то зерна порошка «запоминают», в поле какой индукции они побывали. Если затем протягивать ту же пленку через устройство, реагирующее на намагничение зерен, то можно восстановить исходные сигналы. Это используют в *магнитофонах, видеомагнитофонах, устройствах памяти ЭВМ* и т.д. Поскольку для таких устройств весьма важны быстродействие и разрешающая способность в отношении сигнала, частицы ферромагнитных порошков на пленке имеют размеры порядка одного домена (0,1–1 мкм). С помощью спекания или прессовки из таких порошков изготавливают также *ферриты*, в которых устранены потери энергии, возникающие из-за индукционных токов.
2. Получила применение и магнитострикция. Магнитострикционный *излучатель* преобразует переменный ток обмотки в механические колебания сердечника. Они служат *источниками ультразвука*, применяемого в технологиях, гидроакустике и т.д. Магнитострикционный *приемник* действует наоборот: полученные из окружающей среды ультразвуковые колебания сердечника приводят к его переменному намагничиванию и, следовательно, к переменному индукционному току в обмотке. Такие устройства применяют в качестве датчиков давлений, деформаций деталей машин и т.д.

6.6. Явление электромагнитной индукции

Момент сил (6.12), вращающий рамку с током (см. рис 6.5), совершает работу $\delta A = M d\phi$. Поскольку в данном случае $d\phi = -d\alpha$, то

$$\delta A = -ISBd(\cos \alpha) = Id\Phi_B, \quad (6.16)$$

где учтено соотношение (6.3). Это, однако, не означает, что рамку вращает сила Лоренца — будучи перпендикулярной перемещению, она *работу совершать не может*. При указанном на рис. 6.5 направлении сил \mathbf{F}_{AC} и \mathbf{F}_{ED} свободные заряды описывали бы окружность, перпендикулярную плоскости чертежа, и работа $\mathbf{F}_d d\mathbf{S}$ была бы равна нулю. Однако этому препятствуют границы проводника и источник тока, вынуждающий заряды двигаться вдоль него. Именно энергия источника тока — основа работы (6.16): электродвигатель преобразует его электроэнергию в механическую.

Пусть теперь в проводнике AC ток отсутствует, а перемещает его *внешняя сила* со скоростью \mathbf{v} (рис. 6.12, *a*). Тогда в результате движения в магнитном поле заряды разных знаков движутся по проводнику в противоположных направлениях (в металле движутся только электроны). Разделение зарядов, т.е. формирование ЭДС, происходит до тех пор, пока возникшая электростатическая сила \mathbf{F}_e не остановит этот процесс. Здесь также склады-

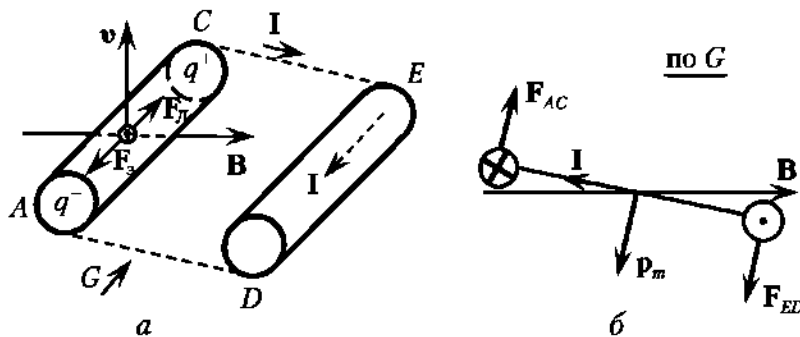


Рис. 6.12

вается ложное впечатление, что работу по формированию ЭДС совершила сила Лоренца. В действительности это *внешняя сила* вызвала и появление силы Лоренца, и неестественное для свободных зарядов движение.

Количественно этот процесс проще оценить, если концы проводника AC соединить внешней цепью (показано пунктиром), образовав такую же рамку, как на рис. 6.5. Тогда вместо *накопления* зарядов на концах проводника AC возникнет *электрический ток* (в формировании ЭДС принимает участие и сторона ED). Работа сторонних сил определяется здесь той же формулой (6.16), но с обратным знаком, в связи с обратным направлением силы тока:

$$\delta A_{\text{ст}} = -Id\Phi_B = -d\Phi_B \frac{dq}{dt} = -dq \frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (6.17)$$

Тогда в соответствии с определением ЭДС (см. параграф 5.8)

$$\mathcal{E}_i = \frac{\delta A_{\text{ст}}}{dq} = -\frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (6.18)$$

Электромагнитная индукция — это явление возникновения ЭДС в контуре вследствие изменения магнитного потока через охваченную им поверхность.

В отличие от электростатической индукции, где одни заряды вызывают появление других, здесь взаимообусловлены разнородные явления. Формула (6.18) выражает **закон Фарадея**, открытый им эмпирически в 1831—1832 гг. Рядом с открытием был и А. Ампер, но он ошибочно полагал, что ток индукции пропорционален магнитному потоку, а не его *изменению во времени*. Как следует из формулы (6.18), *ЭДС электромагнитной индукции равна скорости изменения магнитного потока*.

Если контур замкнут, то возникающая ЭДС приводит к протеканию тока, а смысл знака «минус» в формуле (6.18) выражен **правилом Ленца**: *ток электромагнитной индукции имеет такое направление, что формируемый им магнитный поток препятствует изменению магнитного потока, вызвавшему ЭДС индукции*.

Это еще один пример отрицательной обратной связи.

При повороте рамки по рис. 6.12, *б* магнитный поток сквозь охваченную ею поверхность растёт, а момент сил, возникающий вследствие протекания индукционного тока, направлен в противоположную сторону, т.е. препятствует повороту. Именно поэтому в формуле (6.17) $\delta A_{\text{ст}} < 0$. После того как рамка пройдет вертикальное положение, магнитный поток начнет уменьшаться, а индукционный ток изменит направление на противоположное, препятствуя теперь уже этому уменьшению. Правило Ленца отражает *инерционность магнитного поля* — характерное свойство материи любого вида.

Рисунок 6.12 — это схема энергетического обеспечения всевозможных установок, в том числе ВВТ. Начальные преобразования электроэнергии осуществляют с помощью химических источников постоянного тока (аккумуляторов). Однако их возможности ограничены запуском агрегатов и созданием опорных напряжений, а основную нагрузку несут *генераторы*. Они осуществляют двухступенчатое преобразование: сначала энергию какого-либо вида преобразуют в механическую, т.е. в относительное движение контура и источника магнитного поля. Затем энергия механического движения преобразуется в ЭДС электромагнитной индукции.

Если рамку вращают с угловой скоростью ω , то магнитный поток изменяется по закону $\Phi_B = BS \cos \alpha = BS \cos \omega t$. Подставляя это выражение в формулу (6.18), получим $\mathcal{E}_i = -B\omega S \sin \omega t$. Именно такая ЭДС снимается со *сплошных* контактных колец генератора. Если же применить электрически «развязанные» полукольца (как на рис. 6.5), то с них снимается *частично выпрямленная* ЭДС.

Если применяется не одна рамка, и с каждой i -й рамкой связан магнитный поток Φ_{Bi} , то для расчета ЭДС пользуются *потокосцеплением*, которое выражается формулой $\psi = \sum \Phi_{Bi}$:

$$\mathcal{E}_i = -\sum_i \frac{d\Phi_{Bi}}{dt} = -\frac{d}{dt} \sum_i \Phi_{Bi} = -\frac{d\psi}{dt}. \quad (6.19)$$

На практике рамки (витки) навивают, например, по образующим цилиндра (якоря генератора).

Примеры практики

В промышленных масштабах электроэнергию производят генераторы электростанций, мощность которых достигает $> 10^9$ Вт. В зависимости от природы первичной энергии их называют гидроэлектростанция (падающая вода), тепловая электростанция (пар от сжигания топлива) или атомная электростанция (ядерная энергия). В последние годы распространились также электростанции, использующие энергию ветра, приливов и солнечную энергию.

Применяют генераторы и на отдельных, в том числе подвижных, системах. На атомных подводных лодках используют ядерное топливо, на автомобилях, бронетранспортерах, танках, кораблях — бензин и солярку, на самолетах — керосин, на ракетах — специальное жидкое или твердое топливо. Например, на автомобиле при частоте вращения ротора $(2 \div 3) \cdot 10^3$ об/мин генератор вырабатывает ЭДС 12,5 В и поддерживает общий ток нагрузки 20–30 А, обеспечивающий поджиг рабочей смеси в свече зажигания, работу устройств отопления, освещения, сигнализации и т.д.

Здесь уместно вспомнить сомнения современников Фарадея в пользу открытия электромагнитной индукции. «А какую пользу ждать от младенца?» — отвечал Фарадей. Сегодня ясно, во что этот «младенец» превратился.

6.7. Вихревое электрическое поле

Возникновение ЭДС по схеме рис. 6.12 вызвано движением проводника, однако *движение относительно!* Поэтому ЭДС появляется независимо от того, что именно движется в лабораторной системе отсчета — контур или магнит. Более того, в формуле (6.18) признаки движения вообще отсутствуют, и единственной причиной возникновения ЭДС выступает *изменение магнитного потока*. Оно может произойти вообще не из-за движения, а вследствие изменения тока в контуре, его деформации и т.д.

Какие же силы действуют на свободные заряды контура в той системе отсчета, где он неподвижен? Нам пока известны только электростатическая сила, сила Лоренца и сторонняя сила, сосредоточенная, например, в аккумуляторе. Здесь же ЭДС *распределена по контуру* и в каждой его точке совершает работу по перемещению заряда. Представим формулу (6.18) в виде

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S}, \quad (6.20)$$

где S — поверхность, охваченная контуром. Последнее преобразование справедливо, если контур во времени не меняется, а переход к символу ∂ частной производной связан с тем, что вектор \mathbf{B} может зависеть не только от времени, но и от координат. Формула (6.20) принципиально отличает обсуждаемое поле от электростатического, для которого работа по замкнутому контуру равна нулю. Максвелл назвал его вихревым: *вихревое электрическое поле порождается не разделенными электрическими зарядами, а изменяющимся во времени магнитным полем.*

Силовые линии вихревого поля замкнуты в пространстве вокруг линий $\mathbf{B}(t)$.

В непроводящей среде, например в воздухе, вихревое поле может себя не проявлять, но в *проводящем* контуре под его действием возникает ток проводимости. Контур выполняет здесь ту же роль *индикатора* вихревого поля, что пробный заряд в электростатическом поле или стрелка компаса — в магнитном. Если же в области вихревого поля находится *объемная* проводящая среда, то в ней возникает множество вихревых электрических токов, уже не ограниченных размерами и формой контура. Они названы **токами Фуко** — по имени французского физика Ж. Фуко (1819–1868).

Примеры практики

На описанных явлениях основан целый ряд технических решений. Например, обмотки генератора, в которых возбуждается ЭДС, могут находиться в его *неподвижной* части (статоре), а вращается магнит (ротор). Так работает *магнето* — элемент системы зажигания в некоторых двигателях. Подобным же образом устроен *магнитоэлектрический датчик*, который применяют в бесконтактных системах зажигания, где он управляет моментом искрообразования в свечах. Аналогичным образом работает и *бетатрон* — индукционный ускоритель электронов. Он содержит вакуумную тороидальную камеру, расположенную между полюсами электромагнита, создающего переменное магнитное поле $\mathbf{B}(t)$. В результате в камере образуется вихревое электрическое поле, ускоряющее электроны до больших скоростей.

Токи Фуко позволяют разогревать проводники *дистанционно*, что применяют для удаления абсорбированных газов из электродов электровакуумных приборов, для плавки в вакууме (индукционные печи) и т.д.

Среди демпферов, устраняющих вредные колебания в различных приборах и устройствах, применяют и магнитоиндукционные. Между полюсами магнита располагают металлический сегмент, прикрепленный к подвижной части измерительного прибора. При колебаниях сегмента в нем возбуждаются вихревые токи, которые, по правилу Ленца, создают магнитные поля, препятствующие изменению магнитного потока через сегмент.

Токи Фуко используют в *тахометрах* и *спидометрах*. На первичном валу от двигателя или коробки передач закрепляют магнит, который при вращении возбуждает токи Фуко в детали, закрепленной на втором валу. В результате возникает момент сил, вращающий деталь вслед за магнитом и зависящий от *скорости вращения* первого вала. Спиральная пружина на втором валу противодействует вращению. В результате устанавливается такой угол поворота (проградуированный в значениях угловой скорости), при котором вращающий момент уравновешен упругим.

Токи Фуко вызывают и *вредные последствия*. В качестве источника переменного магнитного поля чаще всего служат электромагниты — катушки (обмотки) с *ферромагнитными сердечниками*. При изменениях магнитного потока в теле сердечников возникают токи Фуко — с соответствующей потерей энергии на джоулеву теплоту и понижением КПД устройства. Кроме того, реактивное (тормозящее) влияние токов Фуко, препятствуя изменениям магнитного потока, уменьшает быстродействие устройств. Поэтому сердечники изготавливают из *электрически изолированных друг от друга тонких пластин*. Так делают, например, в некоторых генераторах: якорь собирают из пластин жести, оклеенных тонкой бумагой. Таким же образом конструируют ферромагнитные сердечники трансформаторов, автомобильных катушек зажигания и т.д. Широко применяют и *ферриты* — материалы, сочетающие большие значения магнитной проницаемости с высоким электрическим сопротивлением.

6.8. Самоиндукция и взаимная индукция

Если ток в контуре переменный, то индукция создаваемого им магнитного поля изменяется во времени. Вследствие этого изменяется магнитный поток и, соответственно, возникает электромагнитная индукция. Электромагнитная индукция, вызванная изменением тока в проводнике, называется **самоиндукцией**.

Ее обнаружил американский физик Д. Генри (1797—1878) на следующий год после открытия М. Фарадея. С практической точки зрения удобнее определять зависимость $\mathcal{E}_c(I)$, чем $\mathcal{E}_c(\Phi)$ (индекс «с» означает самоиндукцию). Чтобы это сделать, нужно подставить зависимость $\Phi(I)$ в формулу (6.18). Согласно формулам (6.2), (6.3) $\Phi \sim I$, т.е.

$$\Phi = LI, \quad (6.21)$$

где коэффициент L называется **индуктивностью** проводника. Как выяснил Д. Генри, индуктивность зависит от размеров и конфигурации проводника: из провода с одним и тем же током могут быть сформированы разные контуры. Единица индуктивности — **генри** (Гн): $1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб}/1 \text{ А}$. Подставляя соотношение (6.21) в формулу (6.18), получаем

$$\mathcal{E}_c = -\frac{d(LI)}{dt} = -L\frac{dI}{dt}, \quad (6.22)$$

где предполагается $L = \text{const}$, т.е. ЭДС самоиндукции пропорциональна скорости изменения тока в проводнике.

ВОПРОС. Каков физический смысл коэффициента L ?

ОТВЕТ. Его можно извлечь из формулы (6.21), но практически важнее (6.22): индуктивность показывает, какая ЭДС самоиндукции возникает в проводнике при скорости изменения тока в нем 1 А/с .

Для расчета индуктивности нужно определить зависимость $\Phi(I)$ и сопоставить ее с соотношением (6.21). Наиболее распространенной конфигурацией провода в индукционных устройствах является соленоид (катушка с плотно намотанным проводом). Его магнитное поле (рис. 6.13, б) весьма

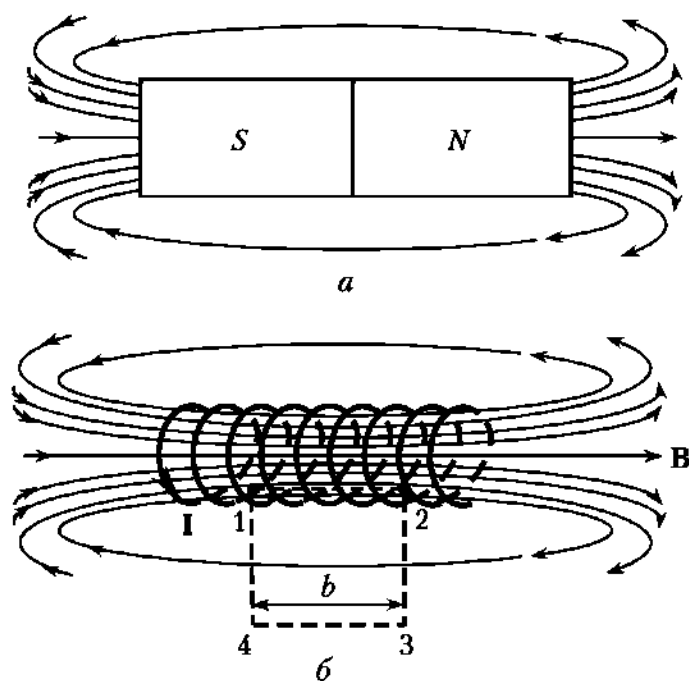


Рис. 6.13

похоже на поле постоянного магнита (рис. 6.13, *a*). Соленоид часто служит источником магнитного поля в электронике, автоматике, электро- и радиотехнике. По сравнению с постоянным магнитом его преимущество в том, что он позволяет регулировать магнитную индукцию путем изменения силы тока, т.е. является **электромагнитом**. В соленоиде можно также использовать его внутреннее поле, где оно практически однородно (это поле изучают в лабораторном практикуме).

Чтобы найти зависимость $\Phi(I)$ такого поля, нужно, как следует из формулы (6.3), определить его индукцию \mathbf{B} . Удобным инструментом для этого служит формула (6.6). Выберем контур 12341 (рис. 6.13, *б*), для которого вычисление циркуляции существенно упрощается, поскольку у боковой поверхности соленоида поле практически отсутствует, проекции вектора \mathbf{B} на стороны 2–3, 3–4 и 4–1 равны нулю, а элементы $d\mathbf{l}$ стороны 1–2 параллельны вектору \mathbf{B} . Для такого контура формула (6.6) принимает простой вид: $Bl = \mu_0 nbI$, где nb — число токов (витков), охваченных контуром, или

$$B = \mu_0 nI,$$

где n — число витков на единицу длины соленоида (отсюда и употребляемый в электро- и радиотехнике термин «ампер-витки»).

В соответствии с формулами (6.3) и (6.13) магнитный поток через площадь, охваченную одним витком, внутри которого — среда с магнитной проницаемостью μ , равен $\Phi' = BS = \mu\mu_0 nIS$. Тогда потокосцепление для всех N витков соленоида

$$\Psi = N\Phi' = nI\Phi' = \mu\mu_0 n^2 VI, \quad (6.23)$$

где l — длина соленоида; $V = lS$ — его объем. Сопоставляя формулу (6.23) с (6.21), получаем

$$L = \mu\mu_0 n^2 V. \quad (6.24)$$

Примеры практики

Как следует из формулы (6.24), для увеличения индуктивности соленоидов нужно использовать *сердечники* с большой магнитной проницаемостью μ , т.е. из ферромагнитных материалов. Если перемещать такой сердечник внутри соленоида, изменяя L , то, как следует из формулы (6.22), изменяется ЭДС самоиндукции. Такую схему широко используют в качестве датчика положения в разного рода индукционных преобразователях. Их применяют при контроле количества деталей, процесса их обработки и т.д.

Согласно правилу Ленца при коммутации электрической цепи (ее размыкании или замыкании) ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_c препятствует изменению тока тем сильнее, чем она больше, т.е. чем больше L и I . ЭДС бывает так велика, что воздушный зазор в месте разрыва цепи пробивается электрической дугой, для чего необходима напряженность поля ~ 20 кВ/см! Поэтому при разрыве силовых цепей принимают меры техники безопасности. Такого же происхождения и искрение между контактами всевозможных коммутаторов. Обычно оно ухудшает характеристики и долговечность устройств и создает на контактах вредный нагар, уменьшающий проводимость цепи. С другой стороны, полученную таким образом дугу применяют и как рабочую — для резки и сварки: касаются электродом металла, через место контакта течет большой ток, а затем электрод отрывают.

Самоиндукция влияет и на распределение переменного тока по сечению проводника. Мысленно выделим в продольном сечении проводника контур A , пронизываемый кольцевыми линиями вектора \mathbf{B} вокруг тока I (рис. 6.14).

Если сила тока увеличивается, то индукция B и магнитный поток через поверхность, охваченную контуром A , растут. Это вызывает ЭДС и ток самоиндукции, препятствующий такому росту. Как ясно из рисунка, их направление таково, что плотность тока в объеме проводника уменьшается, а на поверхности возрастает. В соответствии с формулой (6.22) этот скин-эффект (от англ. *skin* — кожа) тем сильнее, чем выше скорость изменения тока, т.е. его частота. При высоких частотах практически весь переменный ток течет по поверхности проводника. Поэтому в технике сверхвысоких частот (СВЧ), применяемой, например, в радиолокационных станциях, вместо сплошных проводников используют полые волноводы, а резкое уменьшение эффективного сечения проводника (увеличение его активного сопротивления) в какой-то мере компенсируют покрытиями с высокой проводимостью, например серебром.

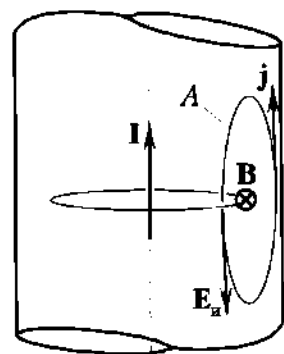


Рис. 6.14

Примеры практики

С помощью скин-эффекта производят, например, закалку холодного оружия. Она эффективнее, чем на открытом пламени, так как уменьшается вероятность перекаливания, из-за чего изделие становится хрупким.

Вследствие скин-эффекта электромагнитная волна не проникает вглубь проводящей среды, что применяют при электромагнитной защите объектов военной техники и электроники, ограждая их металлическими сетками, и т.д.

Электромагнитная индукция может быть вызвана и взаимодействием разных проводников: переменный магнитный поток, созданный одним из них, может вызвать индукционный ток в другом. Поэтому проводные ли-

нии, в том числе проложенные к взрывателям, подвержены индуктивным влияниям силовых сетей, грозовых разрядов и т.д. С другой стороны, взаимная индукция находит нижеописанное и другие применения.

Если магнитный поток Φ_2 через площадь, охваченную вторым контуром, создан током I_1 в первом контуре, то, повторяя рассуждения, приведшие к формуле (6.22), получим

$$\Phi_2 = L_{21}I_1, \quad (6.25)$$

где L_{21} в этом случае называется **коэффициентом взаимной индукции**. Подставляя соотношение (6.25) в формулу (6.18), получаем

$$\mathcal{E}_{вз,2} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}, \quad (6.26)$$

где $\mathcal{E}_{вз,2}$ — ЭДС взаимной индукции во втором контуре, вызванная изменением тока в первом. Из сопоставления соотношений (6.25) и (6.21) очевидно, что единица L_{21} — та же, что и L , т.е. генри. Если, наоборот, источником магнитного поля служит второй контур, то

$$\mathcal{E}_{вз,1} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}. \quad (6.27)$$

Нетрудно показать, что $L_{12} = L_{21}$. Взаимную индукцию чаще всего реализуют в **трансформаторе** (рис. 6.15). Он содержит две (или более) обмотки на ферромагнитном сердечнике с количествами витков N_1 и N_2 . *Первичная обмотка* подключается к источнику переменного напряжения U_1 , а *вторичная* — к нагрузке.

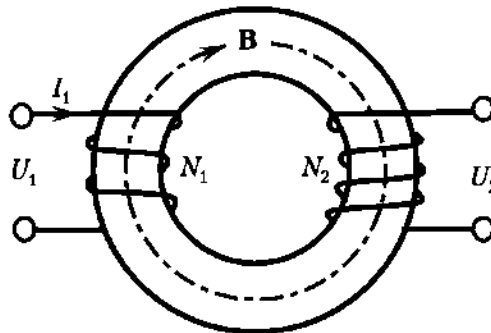


Рис. 6.15

Магнитный поток, создаваемый переменным током I_1 , сосредоточен в ферромагнитном сердечнике и пронизывает обе обмотки. Поэтому $\mathcal{E}_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$, $\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$ (здесь учтено, что в первой обмотке $\mathcal{E}_1 \gg I_1 R_1$). Следовательно,

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k, \quad (6.28)$$

где $k = N_1/N_2$ — **коэффициент трансформации**. Выражение (6.28) характеризует трансформатор как *преобразователь величины переменного напряжения*. При $k > 1$ он называется **понижающим**, а при $k < 1$ — **повышающим**. Поскольку сердечники изготавливают из изолированных друг от друга пластин или ферритов, потери энергии на токи Фуко малы, и поэтому КПД трансформаторов достигает 99%.

Современная техника требует напряжений в огромном диапазоне — 10^{-6} — 10^6 В. Поэтому трансформаторы широко распространены (машины, механизмы, сварочные агрегаты, устройства связи, промышленная, бытовая и космическая радиотехника, электроника, линии электропередач и т.д.).

Если требуется изменить величину постоянного напряжения, его сначала превращают в переменное, а затем изменяют трансформатором и выпрямляют, как, например, в автомобильном электрооборудовании, которое питается от источников постоянного напряжения 12 или 24 В (аккумулятор и генератор), в то время как для искрообразования в свечах требуется 20—30 кВ. Механический или электронный *прерыватель* создает резкие перепады тока в первичной обмотке повышающего трансформатора — *катушке зажигания*. Таким же сочетанием прерыватель — трансформатор пользуются в лампе-вспышке фотокамеры, поскольку ее миниатюрная люминесцентная лампа требует высоких напряжений, и т.д.

Сетевое напряжение, будучи *переменным*, заведомо позволяет пользоваться всевозможными трансформаторами. Поскольку с ростом частоты напряжения потери энергии растут (на излучение, токи Фуко и т.д.), ее стремятся сделать как можно меньшей. Первичные запросы социума были связаны главным образом с освещением. Поэтому разработчики ориентировались на инерционность глаза — минимальная частота, при которой мелькания еще не заметны, — ~ 50 Гц. Она и предусмотрена российскими стандартами (в США, например, — 60 Гц). К сожалению, напряжение такой частоты весьма опасно, так как она близка к одному из основных ритмов головного мозга (α -ритму). Используют в технике и другие частоты — в авиации, например, 400 Гц.

Завершая обсуждение магнитного поля, отметим, что, как и электростатическое, оно обладает энергией. Для ее вычисления воспользуемся работой, производимой ЭДС самоиндукции: $\delta A = \mathcal{E}_c Idt = -LIdl$, где учтено соотношение (6.22). При разрыве цепи сила тока уменьшается до нуля. Интегрируя это выражение от I до 0, получаем $A = LI^2/2$, а единственным результатом исчезновения тока является исчезновение магнитного поля, генерировавшего ЭДС. Следовательно, вычисленная работа совершена током за счет энергии магнитного поля:

$$W_M = \frac{LI^2}{2}. \quad (6.29)$$

Это выражение аналогично формуле (5.26) и отражает тот факт, что магнитное поле — *реальный вид материи*, способный совершать работу.

При обратном процессе, т.е. при подключении катушки к источнику ЭДС, ток нарастает постепенно в соответствии с законом Ома: $\mathcal{E} = IR - \mathcal{E}_c$. Умножив на Idt , получим $\mathcal{E}Idt = I^2Rdt + LIdl$. Отсюда следует, что источник ЭДС совершает работу не только по выделению джоулевой теплоты, но и по формированию магнитного поля. После того как ток установится ($dI = 0$), энергия источника расходуется только на джоулеву теплоту, а в катушке поддерживается запас энергии магнитного поля.

Для соленоида, пользуясь формулами (6.29), (6.24), получим $W_M = \mu_0 n^2 VI^2/2$. В длинном соленоиде поле *однородно*, что позволяет найти *плотность энергии магнитного поля*:

$$w_M = \frac{W_M}{V} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{BH}{2}, \quad (6.30)$$

где разные виды ее представления основаны на соотношениях (6.23) и (6.14).

6.9. Уравнения Максвелла

Как подчеркнуто в параграфе 6.1, само наличие электростатического и магнитного полей относительно. Если в ИСО № 1, связанной с зарядом, существует только электростатическое поле, то в движущейся относительно нее ИСО № 2 тот же заряд образует электрический ток, а значит, и магнитное поле. В неинерциальной системе № 3 оно переменное, и, следовательно, возникает вихревое электрическое поле. При этом все три варианта полей создает один и тот же объект! Логично предположить, что и создаваемые им поля — один и тот же объект, но проявляющий себя по-разному, в зависимости от условий наблюдения. Это содержится и в выдающейся идее Дж. Максвелла (1865): электрическое и магнитное поля существуют совместно и составляют объект, определяемый как электромагнитное поле.

Как следовало из опытов М. Фарадея, вихревое электрическое поле порождается переменным магнитным полем. Исходя из идеи о единстве электрического и магнитного полей Дж. Максвелл предположил, что существует еще и обратный процесс: магнитное поле должно порождаться не только током проводимости, но и переменным электрическим полем (такие идеи симметрии бывают в науке весьма плодотворными).

Пусть в цепи, содержащей заряженный конденсатор C , перевели ключ из положения 1 в положение 2 (рис. 6.16). Во внешней цепи потечет ток проводимости плотностью $j_{\text{пр}}$. Между обкладками конденсатора свободных носителей тока нет, ток проводимости невозможен, но заряд обкладок уменьшается. В соответствии с формулами (5.21) и (5.30)

$$I = \frac{dq}{dt} = S \frac{d\sigma}{dt} = S \frac{dD}{dt} = I_{\text{см}}, \quad (6.31)$$

где S — площадь обкладки. Это уравнение «сшивает» движение свободных зарядов по внешней цепи с переменным электрическим полем внутри конденсатора. Изменение смещения D выполняет здесь роль своеобразного тока, который назван **током смещения** $I_{\text{см}}$.

Как следует из формулы (6.31), ток смещения течет в разрыве тока проводимости, равен ему и «продолжает» его в той среде, где заряды отсутствуют:

$$j_{\text{см}} = \frac{\partial D}{\partial t}. \quad (6.32)$$

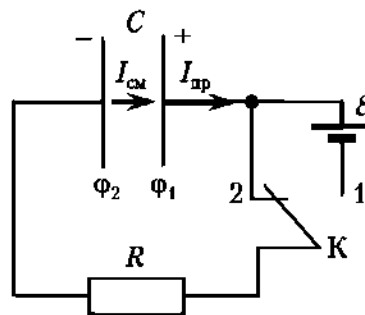


Рис. 6.16

Здесь учтена сонаправленность векторов \mathbf{j} и \mathbf{D} и использован символ *частной* производной, который учитывает, что \mathbf{D} может зависеть не только от времени, но и от координат.

В рассмотренном примере токи проводимости и смещения пространственно разделены, однако они могут сосуществовать в одной и той же области. При этом сумму тока проводимости и тока смещения называют **полным током**:

$$\mathbf{j}_\Sigma = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}. \quad (6.33)$$

Если распределение зарядов меняется во времени и линии тока проводимости разрываются, то их замыкают токи смещения. Это обеспечивает **непрерывность полного тока** и определяет особенность *цепей переменного тока*.

Расширение идеи Дж. Максвелла состояло также в том, что ток смещения, наряду с током проводимости, является *источником магнитного поля*. Генерация магнитного поля переменным электрическим полем — процесс, обратный электромагнитной индукции: его можно было бы назвать *магнитоэлектрической индукцией*.

Таким образом, наличие магнитного поля — это свидетельство электрического тока, независимо от того, создан он движущимися зарядами или переменным электрическим полем. Это требует внести коррективы в формулу (6.6) в виде

$$\int_L \mathbf{B} d\mathbf{l} = \mu_0 \int_S \left(\mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) d\mathbf{S}. \quad (6.34)$$

Справедливость формулы (6.34) подтвердил российский физик А. А. Эйхенвальд (1864—1944). В его эксперименте диаметрально противоположные края диэлектрического диска размещались между пластинами двух заряженных конденсаторов с противоположными направленностями полей. Поэтому при вращении диска его поляризация периодически меняла направление, т.е. возникал ток смещения. И, как выяснилось, он действительно порождал магнитное поле.

Исходя из единства электрического и магнитного полей Дж. Максвелл свел все описывающие их уравнения в общую систему, которая в математической форме совмещает идеи М. Фарадея с его собственными идеями:

$$\oint_S \mathbf{E} d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_S \rho dV; \quad (6.35)$$

$$\oint_S \mathbf{E} d\mathbf{l} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S}; \quad (6.36)$$

$$\oint_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0; \quad (6.37)$$

$$\oint_L \mathbf{B} d\mathbf{l} = \mu_0 \int_S \left(\mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) d\mathbf{S}. \quad (6.38)$$

Эти уравнения дополняются уравнениями (5.30), (6.14) и (5.35), которые учитывают свойства среды и попарно связывают векторы \mathbf{E} и \mathbf{D} , а также векторы \mathbf{B} и \mathbf{H} .

Уравнения (6.35) и (6.36) выражают тот факт, что источником электрического поля являются как электрические заряды, так и изменяющееся во времени магнитное поле. Уравнения (6.37) и (6.38) показывают, что магнитное поле является вихревым, а его источником служат токи проводимости и смещения. Наконец, уравнения (6.36) и (6.38) указывают на то, что *электрическое и магнитное поля нельзя рассматривать как независимые — имеет смысл лишь их совокупность, именуемая электромагнитным полем*. Только в частных системах отсчета, где $\mathbf{V} = \text{const}$ или $\mathbf{E} = \text{const}$, эти поля можно рассматривать отдельно. Из уравнений Максвелла также следует, что для взаимопревращения электрического и магнитного полей *не нужна никакая среда* — оно может происходить и в вакууме.

Уравнения (6.35)–(6.38) выражены в *интегральной форме*, т.е. описывают электромагнитное поле в макроскопических масштабах — на поверхности и в объеме — и не отвечают на вопрос о поле «в данной точке». Для ответа на него рассмотрим вектор \mathbf{E} , зависящий от одной координаты x и лежащий в плоскости контура 1234 (рис. 6.17). Поскольку сторонам 23 и 41 он ортогонален, его циркуляция определяется только проекциями на стороны 12 и 34. При малом Δx

$$E_{12} = E - \frac{\partial E}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \Delta x, \quad E_{34} = E + \frac{\partial E}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \Delta x.$$

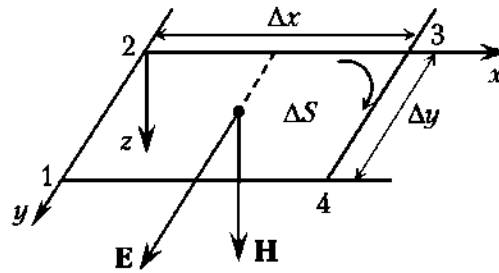


Рис. 6.17

С учетом указанного стрелкой направления обхода контура L имеем

$$\int_L \mathbf{E} d\mathbf{l} = -E_{12} \Delta y + E_{34} \Delta y = \frac{\partial E}{\partial x} \Delta x \Delta y = \frac{\partial E}{\partial x} \Delta S, \quad (6.39)$$

где ΔS — площадь поверхности, охваченной контуром.

Если \mathbf{E} — это напряженность *вихревого* поля, то с учетом соотношений (6.39) и (6.14) получим

$$\frac{\partial E}{\partial x} \Delta S = -\frac{\partial B}{\partial t} \Delta S, \quad \frac{\partial E}{\partial x} \Delta S = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (6.40)$$

Вихревое поле формируется в плоскости, перпендикулярной переменному вектору \mathbf{H} . С другой стороны, если под действием вихревого поля по контуру 1234 циркулирует *переменный* ток смещения, то он формирует магнитное поле, вектор \mathbf{H} которого перпендикулярен плоскости, в которой лежит контур. Если предположить, что вектор \mathbf{H} также зависит только от координаты x , и проделать в отношении его циркуляции те же процедуры, то получим симметричное выражение

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -\epsilon \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}. \quad (6.41)$$

Если векторы \mathbf{E} и \mathbf{H} зависят не от одной, а от *трех* координат, то левые части формул (6.40) и (6.41) содержат совокупность производных, которая образует оператор, именуемый ротором. Однако и в приведенном здесь частном виде выражения (6.40), (6.41) позволяют получить важный результат. Продифференцируем первое из них по x и заменим в правой части порядок дифференцирования:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = -\mu\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right).$$

Подставляя вместо $\partial H/\partial x$ его значение из формулы (6.41), получим

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}. \quad (6.42)$$

Проделав те же процедуры в отношении формулы (6.41), получим

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0 \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}. \quad (6.43)$$

Уравнения (6.42), (6.43) позволяют судить о *форме* существования электромагнитного поля в данной точке пространства, которая будет проанализирована в гл. 7.

Резюме

Подводя итоги настоящей главы, отметим ее основные положения.

Магнитное поле возникает в той системе отсчета, где заряды движутся, а его индукция определяется законом Био — Савара — Лапласа.

Взаимодействие отдельного заряда с магнитным полем определяет сила Лоренца, а множества зарядов в проводнике — сила Ампера. Под действием силы Лоренца заряды движутся по винтовым линиям.

В отношении своих магнитных свойств вещества делятся на пара-, диа- и ферромагнетики, что определяет их поведение в магнитном поле.

Переменный магнитный поток вызывает явление электромагнитной индукции, варианты которого — самоиндукция и взаимная индукция. Помимо электрического поля, порожденного зарядами, существует вихревое электрическое поле, порожденное переменным магнитным полем. Переменное электрическое поле есть ток смещения, который, как и ток проводимости, создает магнитное поле. В сумме с током проводимости ток смещения образует полный ток.

Система уравнений Максвелла обобщает электрические и магнитные явления, устанавливая существование электромагнитного поля.

Явления электромагнетизма играют огромную роль в природе, науке и технике, в том числе относящейся к ВВТ.

Вопросы для самоконтроля

1. Почему постоянный магнит (намагниченный ферромагнетик) нельзя подвергать ударам?
2. Диаметр провода соленоида при сплошной намотке уменьшили. Что больше увеличилось — магнитная индукция на оси соленоида или его электрическое сопротивление?

3. Магнит падает вдоль оси полого металлического цилиндра. Влияет ли разрез по образующей цилиндра на скорость падения магнита?

4. При электросварке последовательно с электродом включена катушка с железным сердечником. Почему она способствует зажиганию и устойчивости горения дуги?

5. Почему при отрыве бугеля трамвая от воздушного провода искрение незначительно, если работает только освещение вагона, а двигатель отключен?

6. Если вращать магнит под горизонтальным алюминиевым диском, закрепленным на вертикальной оси вращения, то диск тоже начнет вращаться. Следует ли из этого, что алюминий притягивается магнитом?

7. В однородное магнитное поле под одинаковыми углами к линиям \mathbf{B} с одинаковыми скоростями влетают электрон и протон. Одновременно ли они выйдут из области поля?

8. Влияет ли движение заряженной частицы в магнитном поле на индукцию этого поля?

9. Чем объяснить, что кривизна траектории электрона, движущегося в магнитном поле, после прохождения сквозь металлическую фольгу увеличивается?

10. Знаки полюсов аккумуляторной батареи стерлись. Как их определить, пользуясь переносной лампой и компасом?

Задачи с решениями

6.1. Выразим орбитальный магнитный момент атома водорода через момент импульса его электрона.

Решение. По определению орбитальный магнитный момент электрона

$$p_m = iS = e\pi r^2/T,$$

где i — орбитальный ток; T — период вращения электрона по орбите радиуса r .

Учитывая соотношение $T = 2\pi r/v$, где v — скорость электрона, получим

$$p_m = evr/2 = e\pi r^2/(2m) = eL/(2m),$$

где L — модуль момента импульса заряда e .

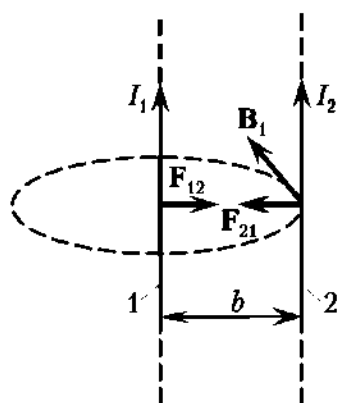


Рис. 6.18

6.2. Сила тока в троллейбусной линии 790,6 А. Расстояние между проводами 50 см (рис. 6.18). С какой силой и в каком направлении они взаимодействуют на участке длиной 200 м?

Решение. Ток I_1 можно рассматривать как источник магнитного поля с индукцией \mathbf{B}_1 , направленной перпендикулярно току I_2 . Пользуясь формулой (6.10), определяем, что на проводник 2 действует сила \mathbf{F}_{21} , направленная к проводнику 1, а ее модуль, приходящейся на единицу длины проводника 2, равен

$$F_{21} = I_2 B_1 = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi b}.$$

Рассуждая точно так же, нетрудно убедиться, что на проводник 1 действует такая же по модулю сила, направленная к проводнику 2, и что при противоположно направленных токах проводники не притягиваются, а отталкиваются.

Подставляя данные, получим $F = 50$ Н.

Примечание. Полученный результат лежит в основе определения единицы силы тока: 1 А — сила такого постоянного тока, который, протекая по параллельным тонким проводникам, находящимся в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, вызывает силу взаимодействия $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

В мощных, особенно сверхпроводящих, соленоидах нужно учитывать силу притяжения между витками. На притяжении параллельных токов основаны некоторые типы реле, а также сжатие плазменного шнура, который можно рассматривать как совокупность параллельных токов. Такой **пинч-эффект** (от англ. *pinch* — сжатие) при токах $\sim 10^6$ А приводит к сильному разогреву плазмы, что используют при решении проблемы управляемого термоядерного синтеза.

6.3. Если пренебречь сопротивлением катушки, то в положении 1 ключа К на рис. 6.19 устанавливается сила тока $I_0 = \mathcal{E}/(R + r)$. Найдем зависимость тока от времени при переключении ключа в положение 2.

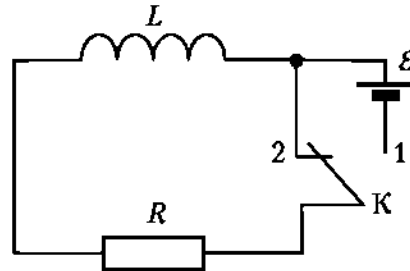


Рис. 6.19

Решение. Мгновенному исчезновению тока противодействует ЭДС самоиндукции (6.22), которая заменяет теперь ЭДС источника тока: $I = \mathcal{E}/R$, т.е. $IR = -LdI/dt$. Разделив переменные и интегрируя, получим

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\frac{R}{L} \int_0^t dt, \quad I = I_0 e^{-t/\tau}, \quad (6.44)$$

где $\tau = L/R$ — **постоянная времени цепи**. При $t = \tau$ ток убывает в e раз. Чем больше τ , тем медленнее убывает ток. Таким же образом можно получить зависимость тока от времени при обратном процессе, когда ключ из положения 2 (при котором $I = 0$) переводится в положение 1. Она имеет вид

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} \left(1 - e^{-t/L/R} \right). \quad (6.45)$$

Примечание. Формулы, подобные (6.44), (6.45), описывают **переходные процессы**, или **релаксацию**. Они определяют инерционность различных устройств, в том числе систем ВВТ, где сказывается индуктивность обмоток двигателей, реле, дросселей — разворот танковой башни или антенны РЛС, включение сети освещения и т.д.

6.4. Протекание переменного тока через конденсатор также инерционно. Одна из схем задержки между выстрелом и готовностью взрывателя снаряда показана на рис. 6.20. Контакты предохранителя 1 во время выстрела замыкаются, и конденсатор C заряжается от источника питания через сопротивление R до того напряжения, которое требуется при его разряде через электродетонатор 3. Разряд возникает при ударе снаряда о цель, в результате которого контакты 2 ударного механизма замыкаются. Найдем зависимость напряжения конденсатора от времени его заряда.

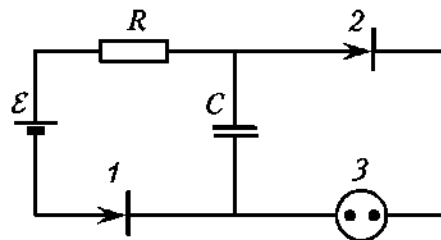


Рис. 6.20

Решение. По закону Ома

$$\mathcal{E} = IR + U_c = \frac{Rdq}{dt} + \frac{q}{C}.$$

Введем переменную $y = \mathcal{E} - \frac{q}{C}$, тогда

$$Cdy = -dq. \quad (6.47)$$

Из формулы (6.46) следует

$$dq = (\mathcal{E} - q/C)dt/R = ydt/R. \quad (6.48)$$

Подставляя соотношение (6.48) в выражение (6.47), получим $dy = -ydt/(RC)$. Разделяя переменные и интегрируя, найдем

$$\int_{\mathcal{E}}^{\mathcal{E} - \frac{q}{C}} \frac{dy}{y} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt, \quad U_c = \mathcal{E} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right). \quad (6.49)$$

Примечание. В данном случае постоянной времени цепи является $\tau = \frac{1}{RC}$.

В отсутствие ЭДС при разряде конденсатора, заряженного до напряжения U_0 , зависимость его напряжения от времени имеет вид $U = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$.

6.5. При размыкании контактов прерывателя индукция в сердечнике катушки зажигания изменяется по закону $B = B_0 e^{-\beta t}$, где $B_0 = 2,7$ Тл, $\beta = 1600$ с⁻¹. Вторичная обмотка катушки имеет 43 000 витков, диаметр сердечника 1,2 см. Чему равна максимальная ЭДС во вторичной обмотке?

Дано: $B = B_0 e^{-\beta t}$; $B_0 = 2,7$ Тл; $\beta = 1600$ с⁻¹; $N = 43\,000$; $d = 1,2$ см = 0,012 м.
 $\mathcal{E} = ?$

Решение. По закону Фарадея

$$\mathcal{E} = -\frac{d\psi}{dt},$$

где $\psi = NBS = N\pi r^2$. Таким образом,

$$\mathcal{E} = -\frac{N\pi d^2}{4} B_0 \beta e^{-\beta t}.$$

Отсюда максимальное значение ЭДС $\mathcal{E} = 0,25N\pi d^2 B_0 \beta$.

Подставляя данные, получим $\mathcal{E} = 21,1$ кВ.

Задачи для самостоятельного решения

6.6. Рамка микроамперметра, имеющего предел измерения 100 мкА, содержит 400 витков проволоки, намотанной на прямоугольный каркас со сторонами 2,2 на 1,9 см. Каков магнитный момент рамки при отклонении стрелки прибора на половину шкалы?

6.7. К пластинам конденсатора емкостью 4,5 мкФ с зарядом $6 \cdot 10^{-4}$ Кл подключают катушку с индуктивностью $2 \cdot 10^{-4}$ Гн и пренебрежимо малым сопротивлением. Какой максимальный ток возникнет в катушке?

6.8. Заряженная частица движется в однородном магнитном поле с шагом спиральной траектории в полтора раза больше ее диаметра. Под каким углом к вектору \mathbf{B} частица влетела в магнитное поле?

6.9. Соленоид имеет длину 50 см, диаметр 5 см и выполнен однослойной сплошной намоткой. При токе в нем 2 А индукция на оси 2,5 мТл. Какова индуктивность соленоида?

6.10. По первичной обмотке катушки зажигания с числом витков 185 размыкается ток 5,5 А, создающий в сердечнике длиной 6 см магнитное поле с объемной плотностью энергии 17 кДж/м³. Какова магнитная проницаемость сердечника?

Раздел III

**КОЛЕБАНИЯ
И ВОЛНЫ**



Глава 7

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Понимание — это разменная монета между мозгом и миром.

В результате изучения данной главы учащийся должен:

знать

- предмет, цели, эмпирические основания, основные понятия, модели и положения теории колебательных и волновых процессов;
- физическую сущность и законы механических и электромагнитных колебаний и волн, их сходства и различия;
- принцип Гюйгенса, законы фотометрии, эффект Доплера и их проявления в природе и технике;

уметь

- распознавать, вычленять и анализировать проявления закономерностей колебательных и волновых процессов в изучаемых объектах природы и техники, в том числе военной;
- формулировать изучаемую военно-техническую задачу с позиций законов колебательных и волновых процессов и применять аппарат теории для ее решения;

владеть

- навыками применения законов колебательных и волновых процессов при решении военно-технических задач, сформулированных как физические;
- навыками привлечения физических констант, справочных данных, оценки порядка величин и опоры на их размерности при решении задач, связанных с колебательными и волновыми процессами.

7.1. Гармонические колебания

Существуют такие виды движения материи, при которых характеристики системы повторяются во времени. Они называются колебаниями и обладают особенностями, которые потребовали выделить их в отдельный класс физических явлений.

Если сместить груз по горизонтальной поверхности вдоль оси пружины (рис. 7.1) и затем отпустить, то возникнут колебания относительно положения равновесия $x = 0$. Предоставленные сами себе колебания называются **свободными**, или **собственными**.

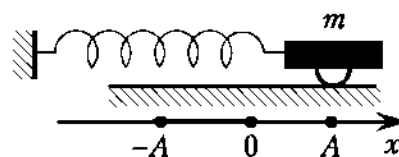


Рис. 7.1

Если трением пренебречь, то на груз действует только упругая сила. В соответствии с формулами (1.34) и (1.37)

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx, \quad (7.1)$$

или

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0, \quad (7.2)$$

где с учетом неравенства $k/m > 0$

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}. \quad (7.3)$$

Уравнение (7.2) — это однородное линейное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами. Его решение

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (7.4)$$

в чем нетрудно убедиться, подставив в уравнение (7.2) x и его производные (A и φ — постоянные):

$$v = \frac{dx}{dt} = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi), \quad (7.5)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi). \quad (7.6)$$

Выражения (7.4)–(7.6) и зависимости $x(t)$ и $v(t)$, показанные на рис. 7.2, объясняют причины колебаний. При возврате груза к положению $x = 0$ его скорость максимальна ($v = -A\omega_0$), мгновенная остановка означала бы $a \rightarrow \infty$, а при $x = 0$, как ясно из выражения (7.6), $a = 0$. В результате груз по инерции переходит к значениям $x < 0$, где направление упругой силы изменяется на обратное. Теперь она тормозит движение, пока при $\omega_0 t + \varphi = \pi$ скорость не упадет до нуля. Как следует из выражения (7.4), это происходит при $x = -A$.

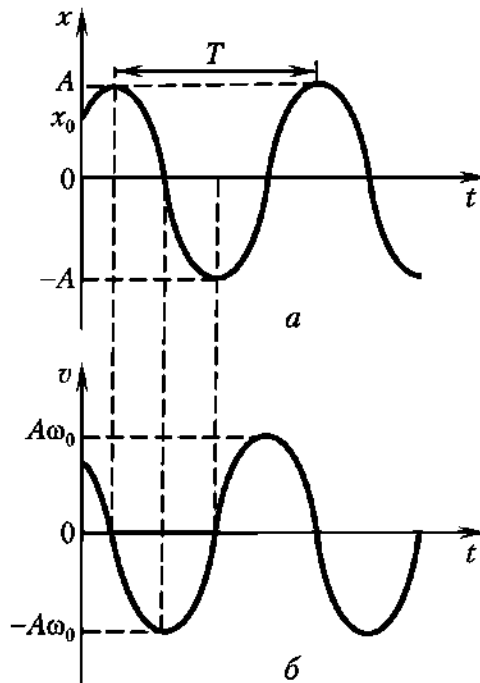


Рис. 7.2

Деформация пружины и модуль силы упругости здесь такие же, как и при $x = A$, поэтому обсуждаемые процессы и их характеристики повторяются. Это отражает симметрия косинуса и синуса относительно $x = 0$.

Колесание, при котором характеристики движения зависят от времени по закону косинуса (синуса), называется гармоническим, а система, которая его совершает, — **гармоническим осциллятором** (от лат. *oscillare* — колебаться).

Из рассмотренного примера следуют *условия колебаний*:

- 1) *наличие силы*, возвращающей систему к положению равновесия;
- 2) *инерционность* системы, вследствие которой она его минует.

Гармонические колебания требуют и дополнительного условия: правая часть формулы (7.1) (возвращающая сила) должна быть *пропорциональна смещению*. Сила упругости этому условию удовлетворяет, а если ему удовлетворяет иная сила, то ее, по аналогии, называют **квазиупругой** (как бы упругой).

Максимальное смещение системы от положения равновесия называется амплитудой колебаний, а аргумент функции, определяющий текущее смещение, — **фазой** колебания. Как следует из формулы (7.4), при $t = 0$ она равна φ , называется **начальной фазой** и определяет *исходную* координату x_0 , с которой колебания начинаются.

Минимальный промежуток времени, через который система проходит то же положение в том же направлении, называется периодом T колебаний: $x(t) = x(t + T)$. Исходя из этого определения получаем равенство $\omega_0(t + T) + \varphi = \omega_0 t + \varphi + 2\pi$, поскольку 2π — минимальное приращение фазы, при котором значения косинуса повторяются. Отсюда

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (7.7)$$

Чем больше жесткость k пружины, тем большее ускорение она придает телу, показанному на рис. 7.1, тем меньше период его колебаний. Чем больше m (инерционность тела), тем больше нужно времени для его ускорения и торможения, и потому период возрастает. Примером могут служить автомобиль той или иной массы на рессорах той или иной жесткости, рояльная струна или мембрана барабана, где роль жесткости играет натяжение. Участок кожи, ограниченный раструбом стетоскопа, также играет роль мембраны. Изменяя давление стетоскопа, врач меняет ее натяжение и, соответственно, частоту ее колебаний.

Величина, обратная периоду T , называется **линейной частотой колебаний**:

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (7.8)$$

Единицей частоты служит **герц** (Гц) — в честь немецкого физика Г. Герца (1857—1894): $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$. Частота колебаний автомобиля на подвеске — $\sim 1 \text{ Гц}$, мембраны звукового сигнала — $\sim 10^3 \text{ Гц}$, света фар — $\sim 10^{15} \text{ Гц}$.

Из формул (7.3), (7.7) и (7.8) следует также соотношение для **круговой, или циклической, частоты**:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu, \quad (7.9)$$

которая показывает *число колебаний за 2π секунд*. Поскольку она определяется выражением (7.3), т.е. свойствами *самой системы*, ее называют **собственной частотой**.

Колебательные системы зачастую создают для преобразования энергии. Например, колебания поршней в цилиндре двигателя преобразуют в энергию поступательного движения автомобиля. Биологический (мышечный) поршневой двигатель управляет крыльями мух и пчел.

ВОПРОС. Какова энергия колебаний пружинного маятника?

ОТВЕТ. Его потенциальная, кинетическая и полная энергии определяются следующими формулами:

$$E_n = \frac{kx^2}{2} = \left(\frac{kA^2}{2}\right) \cos^2(\omega_0 t + \varphi); \quad (7.10)$$

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \left(\frac{mA^2\omega_0^2}{2}\right) \sin^2(\omega_0 t + \varphi); \quad (7.11)$$

$$E = E_n + E_k = \frac{kA^2}{2} = \frac{mA^2\omega_0^2}{2}. \quad (7.12)$$

Постоянство полной энергии системы обусловлено тем, что упругие силы относятся к консервативным. При этом средняя кинетическая и потенциальная энергии, как видим, равны, в соответствии с равномерным распределением энергии по степеням свободы.

7.2. Физический маятник

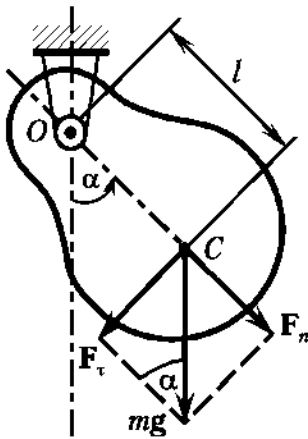


Рис. 7.3

Каждый вид осциллятора имеет свои особенности и свою область применения. Твердое тело на подвесе (рис. 7.3), как и пружинный маятник, относится к физическим маятникам (их колебания изучают в лабораторном практикуме). Поскольку точка O подвеса не совпадает с центром C инерции тела, то при отклонении от положения равновесия возникает возвращающий момент, создаваемый силой $F_\tau = -mg \sin \alpha \approx -mg\alpha$, где последнее равенство справедливо только для малых α , а знак «минус» обусловлен противоположными направлениями отсчета угла α и вектора F_τ . Поскольку модуль F_τ пропорционален смещению α , возвращающая сила является *квазиупругой*. В соответствии с формулой (3.27) $Jd^2\alpha/dt^2 = F_\tau l$, т.е.

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \omega_0^2 \alpha = 0, \quad (7.13)$$

где

$$\omega_0^2 = \frac{mgl}{J}. \quad (7.14)$$

Как видим, несмотря на иной физический процесс, уравнения (7.2) и (7.13) совершенно аналогичны. Следовательно, и решения аналогичны:

$$\alpha = \alpha_0 \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

На основании соотношений (7.14) и (7.9) период колебаний такого маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}}. \quad (7.15)$$

Как и у пружинного маятника, потенциальная энергия переходит здесь в кинетическую и обратно. Частным случаем этого маятника является материальная точка, подвешенная на невесомой нерастяжимой нити, которую называют **математическим маятником**. В этом случае $J = ml^2$, и потому

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (7.16)$$

Примеры практики

Колебания маятника часов (его идею выдвинул еще Г. Галилей), линий электропередач, мостов, зданий и т.д. подчиняются описанным закономерностям. Практически важны также **крутильные колебания** тел относительно оси под действием *деформации кручения*. Их испытывают валы двигателей, полуоси автомобилей, грузы на тросах, элементы измерительных приборов и т.д.

Пользуясь формулой (7.16), можно с высокой точностью измерять ускорение g и тем самым определять залегание в земной коре полезных ископаемых (гравиметрическая разведка), а также локальные влияния на траектории военно-космических систем и астероидов (один из них недавно пролетел в опасной близости от Земли, столкновение могло бы привести к глобальной катастрофе).

Два шара массами по 10 кг, подвешенные на кварцевых нитях и разнесенные на расстояние 4 км, служили базой лазерного интерферометра, позволившего в 2015 г. зафиксировать гравитационные волны, возникшие при слиянии черных дыр (см. подпараграф 1.4.3).

7.3. Колебательный контур

Электромагнитным явлениям также присущи колебания. Кулоновская сила возвращает заряженный конденсатор к равновесию (рис. 7.4, а) — первое условие колебаний. Второе условие выполняется благодаря току в катушке индуктивности: при достижении равновесия (рис. 7.4, б) он мгновенно исчезнуть не может вследствие инерционной самоиндукции, которая вызывает новое разделение зарядов (рис. 7.4, в). Далее процессы повторяются в обратном направлении. Механические аналоги в соответствующих фазах показаны рядом на рис. 7.4, з, д.

Для получения количественных характеристик воспользуемся равенствами

$$U_L = U_C, \quad U_C = \frac{q^2}{C}, \quad U_L = -\frac{Ld^2q}{dt^2}, \quad \text{из которых}$$

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{LC}q = 0, \quad (7.17)$$

т.е.

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \omega_0^2 q = 0, \quad (7.18)$$

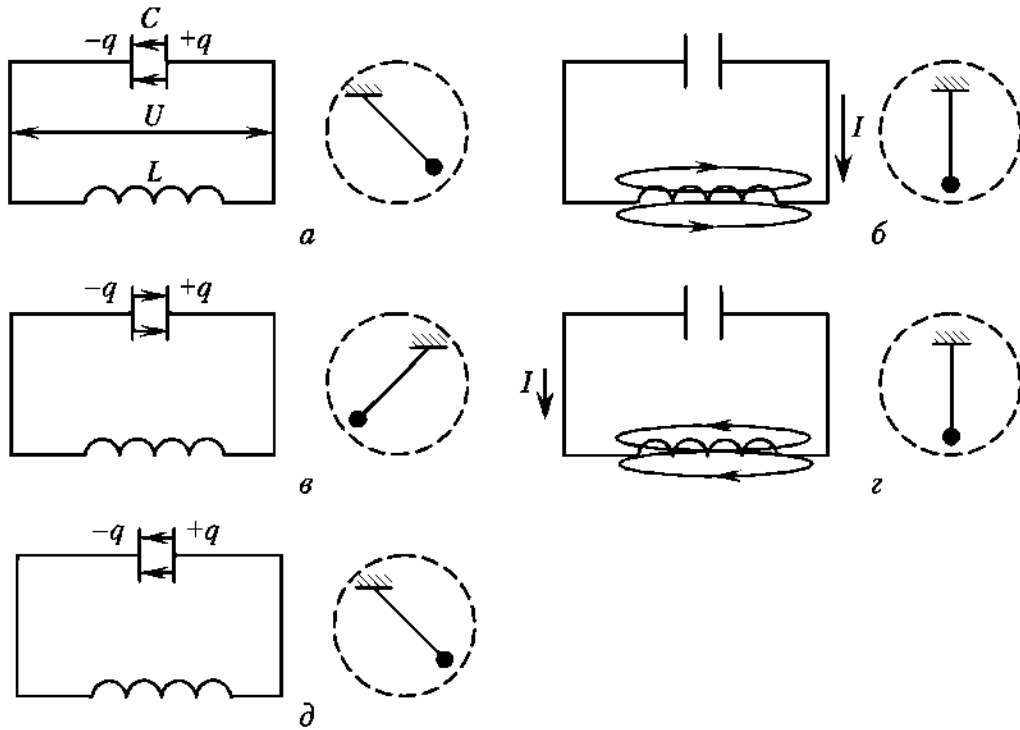


Рис. 7.4

где

$$\omega_0^2 q = \frac{1}{LC}. \quad (7.19)$$

Как видим, уравнение (7.18) совершенно аналогично уравнениям (7.2) и (7.13). Следовательно, и решение имеет тот же вид:

$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi). \quad (7.20)$$

Поскольку ω_0 определяется только характеристиками L и C самой системы (колебательного контура), она, как и в формуле (7.9), является *собственной частотой*. Из соотношений (7.19), (7.9) следует **формула Томсона**:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (7.21)$$

ВОПРОС. Какой ток течет в колебательном контуре?

ОТВЕТ. Он определяется производной выражения (7.20):

$$I = \frac{dq}{dt} = -q_m \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi) = q_m \omega_0 \cos\left(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right). \quad (7.22)$$

В моменты, показанные на рис. 7.4, *а, в* конденсатор заряжен, ток отсутствует и вся энергия контура сосредоточена в электростатическом поле:

$W_{cm} = \frac{q_m^2}{2C}$. В моменты, показанные на рис. 7.4, *б, з*, заряд конденсатора равен нулю, сила тока максимальна и вся энергия контура сосредоточена в магнитном поле катушки:

$$W_{Lm} = \frac{LI_m^2}{2} = \frac{Lq_m^2 \omega_0^2}{2} = \frac{q_m^2}{2C}. \quad (7.23)$$

Как видим, здесь выполняются закон сохранения энергии и равномерное распределение средней энергии по электрической и магнитной составляющим (степеням свободы): $W_{Cm} = W_{Lm}$. При промежуточных фазах колебаний энергия распределена между катушкой и конденсатором (колебательный контур изучается в лабораторном практикуме).

В процессе электромагнитных колебаний преобразование энергии электрического поля в энергию магнитного поля и обратно происходит при сохранении их суммарного значения.

Итак, оказывается, что уравнение (7.2) носит универсальный характер. В ритме сердца и приливов, в колебаниях сооружений, мостов, зарядов и токов в контуре обнаруживаются общие закономерности. Поэтому уравнение (7.2) является *математической моделью* гармонического осциллятора, не зависящей от его физической природы.

7.4. Затухающие колебания

Свободные гармонические колебания — это идеализированная модель *вечного двигателя*. Тем не менее, как и другие идеальные модели, она служит полезной базой изучения реальных процессов, в которых неизбежно *рассеяние энергии* на трение, излучение и т.д.

Поскольку из формул (7.12) и (7.23) следует, что энергия колебаний разной природы пропорциональна квадрату их амплитуды, то в результате потерь энергии амплитуда уменьшается. Свободные колебания с уменьшающейся амплитудой называют **затухающими**. При малых скоростях движения тел, например пружинного маятника, существует сила трения, пропорциональная скорости, и потому уравнение (7.1) следует дополнить еще одним членом:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx - \gamma \frac{dx}{dt}. \quad (7.24)$$

Отсюда

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\delta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0, \quad (7.25)$$

где помимо использования соотношения (7.3) введено обозначение

$$\frac{\gamma}{m} = 2\delta. \quad (7.26)$$

Уравнение (7.25) можно свести к виду (7.1) путем замены переменной: $x = e^{-\delta t} y(t)$. Если это выражение и его производные подставить в уравнение (7.25), то получим

$$\frac{d^2y}{dt^2} + \omega^2 y = 0, \quad (7.27)$$

где

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \delta^2. \quad (7.28)$$

Теперь уравнение (7.27) имеет такой же вид, как (7.1), и решение аналогично: $y = A_0 \cos(\omega t + \varphi)$. Возвращаясь к исходной переменной, находим

$$x = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi). \quad (7.29)$$

ВОПРОС. Чем затухающие колебания отличаются от собственных?

ОТВЕТ. Из формулы (7.28) следует, что частота ω затухающих колебаний меньше, чем собственных, а коэффициент перед косинусом в формуле (7.29) представляет собой экспоненциально уменьшающуюся *амплитуду колебаний* (рис. 7.5). Поскольку такие колебания гармоническими уже не являются, термины «амплитуда», «частота» и др. можно применять лишь по отношению к *данному циклу* колебаний.

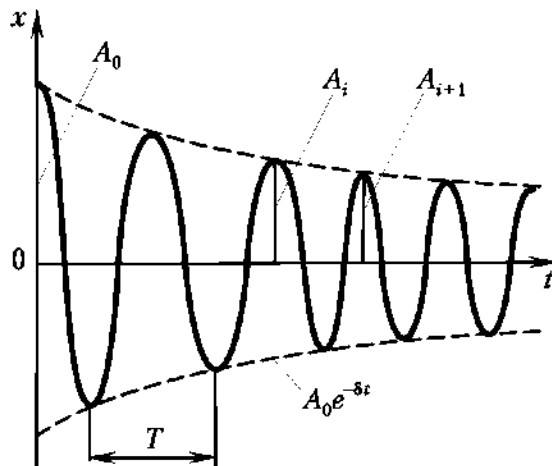


Рис. 7.5

Параметр δ , определяющий скорость уменьшения амплитуды, называется **коэффициентом затухания**. Затухание характеризуют также отношением амплитуд двух следующих друг за другом циклов (см. рис. 7.5), которое называют **декрементом затухания**:

$$\frac{A(t)}{A(t+T)} = e^{\delta t}. \quad (7.30)$$

На практике удобнее применять **логарифмический декремент затухания**

$$\Theta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \delta t. \quad (7.31)$$

Скорость затухания колебаний изменяется в широких пределах. Возможен и такой процесс, когда колебания прекращаются сразу. Его называют **апериодическим**. Пример — поведение подвески легкового автомобиля, кузов которого придавлен и отпущен.

Затухание **электромагнитных** колебаний происходит в результате потери энергии на джоулеву теплоту, которая также возникает как результат своеобразного трения направленно движущихся зарядов. Поскольку $U_L = U_C + IR$, уравнение (7.17) дополняется еще одним членом:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0. \quad (7.32)$$

Помимо использования соотношения (7.19) введем обозначение

$$\frac{R}{L} = 2\delta. \quad (7.33)$$

В результате получим такое же уравнение, как (7.25), и аналогичное решение:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\delta\frac{dq}{dt} + \omega_0^2q = 0, \quad (7.34)$$

$$q = q_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi), \quad (7.35)$$

где ω по-прежнему определяется выражением (7.28). Здесь справедливы и рис. 7.5 (с соответствующей заменой x на q), и соотношение (7.31).

ВОПРОС. Полезны колебания или вредны?

ОТВЕТ. Ответы на подобные вопросы составляют диалектическое единство противоположностей.

Примеры практики

Чрезмерная жесткость механических систем приводит к разрушению зданий, сооружений, станков, перевозимых грузов... Во избежание этого применяют элементы, которые преобразуют нагрузки в энергию упругих колебаний, — подвески, растяжки, прокладки и т.п. Например, сейсмическую стойкость зданий обеспечивают мощной упругой «подушкой». Однако их полезность содержит и свою противоположность — возникают неудобства в управлении автомобилем, увеличивается время измерения стрелочным прибором и т.д. Поэтому в сочетании с упругими элементами применяют *демпферы* (гасители колебаний) — воздушные, жидкостные или электромагнитные.

В ряде случаев колебания являются целью, их затухание нежелательно, и тогда применяют подшипники, смазки, отполированные опоры осей (часы) и т.п.

7.5. Вынужденные механические колебания

Средства, уменьшающие потери энергии колебаний, не устраняют их полностью. Единственный способ поддержания колебаний — компенсация потерь энергии путем внешнего воздействия. Колебания, происходящие в результате внешнего воздействия, называются **вынужденными**.

ВОПРОС. Может ли сила, поддерживающая колебания, быть однократной или постоянной?

ОТВЕТ. Нет. Первая способна лишь вывести систему из положения равновесия, а вторая приводит только к его смещению.

Отсюда следует, что внешняя сила должна быть *периодической*, причем принципиально важны моменты ее воздействия. Их может задавать и сама система, которую в таком случае называют **автоколебательной**.

Примеры практики

Когда маятник часов проходит через положение равновесия, то через анкерный механизм, связанный с заведенной пружиной, ему сообщается толчок. Зуммеры и вибраторы содержат электромагнит, подобный изображенному на рис. 6.11, но его катушка подключена к источнику напряжения через упругую пластину с подвижным контактом. При протекании тока через катушку сердечник втягивается в электромагнит, толкает упругую пластину и размыкает контакты. В результате электромагнит и сердечник размагничиваются, упругая мембрана воз-

вращает сердечник в исходное положение, контакты вновь замыкаются, и цикл повторяется.

Типичными автоколбательными системами являются ДВС и автоматическое оружие, в котором часть энергии пороховых газов вызывает следующие действия: движение затвора назад с изъятием и выбросом гильзы; наведение ударного механизма; движение затвора вперед с захватом следующего патрона; запираение ствола затвором; освобождение ударного механизма спусковым устройством; удар бойка по капсюлю. Таким образом, пружинный маятник затвора воспроизводит цикл: сначала затвор, двигаясь назад, сжимает возвратную пружину, потом эта пружина толкает его вперед.

Для количественного анализа вынужденных колебаний представим, что внешняя сила изменяется по гармоническому закону (основания для этого предположения обсуждаются в параграфе 7.10):

$$F = F_0 \cos(\omega t). \quad (7.36)$$

Тогда в правой части уравнения (7.24) появляется еще одно слагаемое:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx - \gamma \frac{dx}{dt} + F_0 \cos(\omega t). \quad (7.37)$$

Пользуясь прежними обозначениями, получим

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\delta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{F_0}{m} \cos(\omega t). \quad (7.38)$$

Это уравнение, вследствие наличия правой части, уже является *неоднородным*. Его решение равно сумме общего решения однородного уравнения (7.25) и частного решения уравнения (7.38). Первое имеет вид (7.29) и содержит *убывающую во времени* функцию, которая при установившемся режиме значения уже не имеет: по прошествии достаточно большого времени оно перестает влиять на колебания. Что же касается частного решения, то его определяют многочисленные наблюдения. Из них следует, что *под действием периодической силы система колеблется с частотой этой силы*:

$$x = a \cos(\omega t - \alpha). \quad (7.39)$$

Подставляя это выражение и его производные в формулу (7.38), получаем

$$a(\omega_0^2 - \omega^2) \cos(\omega t - \alpha) - 2\delta a \omega \sin(\omega t - \alpha) = \frac{F_0}{m} \cos(\omega t).$$

Раскрывая косинус и синус разности и группируя члены, получим

$$\begin{aligned} a[(\omega_0^2 - \omega^2) \cos \alpha + 2\delta \omega \sin \alpha] \cos \omega t + a[(\omega_0^2 - \omega^2) \sin \alpha - 2\delta \omega \cos \alpha] \sin \omega t = \\ = \frac{F_0}{m} \cos(\omega t). \end{aligned} \quad (7.40)$$

Выражение (7.40) справедливо при *любой* t , включая $\omega t = \pi/2$, при котором

$$(\omega_0^2 - \omega^2) \sin \alpha - 2\delta \omega \cos \alpha = 0. \quad (7.41)$$

С учетом равенства (7.41) выражение (7.40) теперь принимает вид

$$a[(\omega_0^2 - \omega^2) \cos \alpha + 2\delta \omega \sin \alpha] = \frac{F_0}{m}. \quad (7.42)$$

Разрешая систему уравнений (7.41) и (7.42) относительно a и α , находим

$$a = \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2\omega^2}}; \quad (7.43)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2\delta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (7.44)$$

Поскольку для конкретной системы F_0/m , ω_0 и δ — величины постоянные, амплитуда a зависит только от частоты ω и достигает максимума при минимуме подкоренного выражения. Дифференцируя его по ω и приравнявая результат к нулю, получаем $-4\omega_p(\omega_0^2 - \omega_p^2) + 8\delta^2\omega_p = 0$. Одно из решений этого уравнения имеет вид

$$\omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}. \quad (7.45)$$

При $\omega = \omega_p$ амплитуда колебаний максимальна (рис. 7.6).

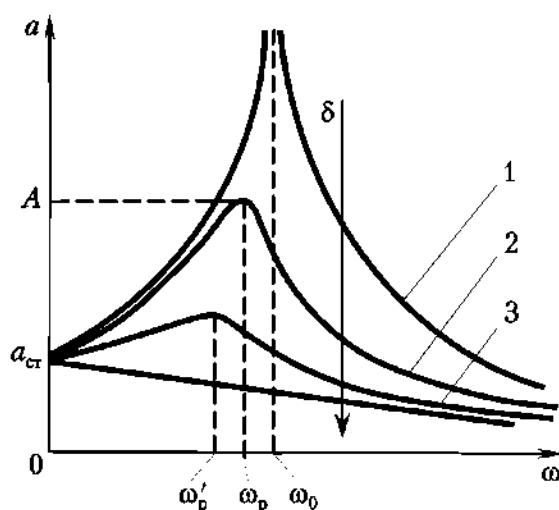


Рис. 7.6

Явление возрастания амплитуды вынужденных колебаний в случае приближения частоты ω изменения внешней силы к частоте ω_p называется **резонансом**.

Подставляя выражение (7.45) в формулу (7.43), найдем резонансную амплитуду:

$$a_p = \frac{F_0/m}{2\delta\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}. \quad (7.46)$$

ВОПРОС. Каковы резонансная амплитуда и частота при малом затухании?

ОТВЕТ. Полагая $\delta^2 \ll \omega_0^2$, получим

$$a_p \approx \frac{F_0/m}{2\delta\omega_0}. \quad (7.47)$$

Как следует из выражения (7.45), при $\delta^2 \ll \omega_0^2$ резонансная частота примерно равна собственной. Это означает, что резонанс наступает, когда внешняя сила действует в такт со свободными колебаниями системы.

Чем меньше δ , тем ближе ω_p к ω_0 , больше резонансная амплитуда, а резонансный максимум уже, острее. И наоборот: чем больше δ , тем меньше резонансная амплитуда и дальше резонансная частота от ω_0 , например $\omega_p' < \omega_p$ (см. рис. 7.6). Резонанс важен тем, что позволяет путем малого воздействия достигать значительных амплитуд колебаний.

Примеры практики

Резонанс используют при укладке бетона, погружении свай в грунт, измельчении пород, возбуждении камертонов, струн музыкальных инструментов и голосовых связок, резонирующих в гортани. Резонанс электромагнитных колебаний лежит в основе *радио- и видеосвязи*: из множества сигналов колебательный контур приемника выделяет и усиливает лишь тот, частота которого близка к его собственной. Резонансное поглощение электромагнитных колебаний осуществляет и вещество. Например, кристаллическая решетка поваренной соли резонирует на частотах $\sim 10^{13}$ Гц, что соответствует инфракрасному диапазону.

Резонанс бывает и вреден, так как большая амплитуда колебаний влечет деформации и разрушения. Мост представляет собой колебательную систему, которая может войти в резонанс под влиянием согласованного шага пешего строя. Чтобы этого не произошло, строевым уставом предусмотрена команда «Не в ногу!»

Корпуса транспорта, станки, машины и механизмы испытывают вредные вибрации, амплитуда которых зависит от внешних воздействий и частоты вращения двигателей. Если периодические силы попадают в резонанс с опорой или корпусом, то возникают вредные последствия. Поэтому кроме балансировки деталей и узлов подбирают параметры колебательной системы таким образом, чтобы ее собственная частота ω_0 отличалась от частоты внешнего воздействия.

Резонансные колебания могут возникнуть и при поступательном движении. Примеры — движение смычка по струне или обрушение льда Дороги жизни через Ладожское озеро во время блокады Ленинграда. Тяжелый грузовик мог преодолеть маршрут без происшествий, а идущая по тому же пути легкая машина с людьми при некоторой скорости движения проваливалась под лед. Исследования физиков Ленинграда показали, что поверхность льда на воде подобна мембране барабана — при определенных скоростях транспорта возникают изгибно-гравитационные колебания, имеющие собственные частоты. Они зависят от размеров и глубины водоема, а также толщины и свойств льда. В результате автомобилям была предписана определенная скорость движения по Дороге жизни. Подобные явления могут возникнуть и при движении судна на воздушной подушке, ледокола по кромке припая или в ледовом канале, самолета при посадке на лед и т.д.

Опасным бывает и воздушный поток. Он может создавать вихри, поочередно срывающиеся с разных сторон тела, и спровоцировать упругие колебания, которые называются флаттером (от англ. *flutter* — вибрация). Флаттеру подвержены крылья, хвостовое оперение, элероны и рули самолетов, винты вертолетов, лопасти турбин и другие упругие элементы машин. С ним столкнулись в 1930-е гг., когда авиакатастрофы замедлили создание скоростной авиации. Выявив причины флаттера, группа академика М. В. Келдыша (1911–1978) выработала рекомендации по балансировке и компоновке элементов самолета, при которых скорость, вызывающая флаттер, больше максимальной скорости полета.

7.6. Вынужденные электромагнитные колебания

В колебательном контуре (рис. 7.7) роль вынуждающей силы выполняет источник переменного напряжения $U = U_m \cos \omega t$. При этом формула (7.34) принимает вид

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\delta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \frac{U_m}{L} \cos \omega t, \quad (7.48)$$

где использованы прежние обозначения (7.19) и (7.33).

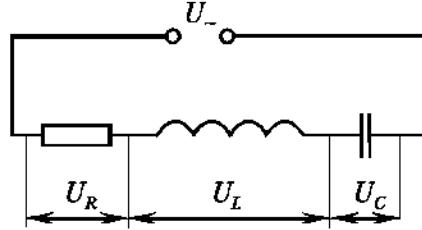


Рис. 7.7

Поскольку это уравнение аналогично уравнению (7.38), то и решение аналогично:

$$q = q_m \cos(\omega t - \alpha), \quad (7.49)$$

где амплитуда q_m удовлетворяет выражению (7.43) с заменой a на q_m и F_0 на U_m :

$$q_m = \frac{U_m}{\omega \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}, \quad (7.50)$$

а фаза удовлетворяет выражению (7.44), которое при подстановке обозначений принимает вид

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R}{\frac{1}{\omega C} - \omega L}. \quad (7.51)$$

Соответственно, для электромагнитных колебаний справедлив и рис. 7.6 с сопутствующими комментариями (затухающие и вынужденные колебания изучаются в лабораторном практикуме).

ВОПРОС. Каковы резонансные частота и амплитуда электромагнитных колебаний?

ОТВЕТ. В соответствии с формулами (7.45) и (7.47)

$$\omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}}, \quad q_p \approx \frac{U_m}{\omega_0 R}. \quad (7.52)$$

Схема, показанная на рис. 7.7, часто реализуется при подключении потребителей электроэнергии к сети переменного напряжения.

ВОПРОС. Как определить ток в цепи, показанной на рис. 7.7?

ОТВЕТ. Формула для силы тока dq/dt следует из соотношения (7.49):

$$I = -q_m \omega \sin(\omega t - \alpha) = I_m \cos(\omega t - \varphi), \quad (7.53)$$

где с учетом формулы (7.50)

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}; \quad \varphi = \alpha - \frac{\pi}{2}. \quad (7.54)$$

Как видим, *переменный ток отстает по фазе от напряжения на угол φ* (рис. 7.8), который определяется из формул (7.19), (7.33), (7.44) и (7.54):

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (7.55)$$

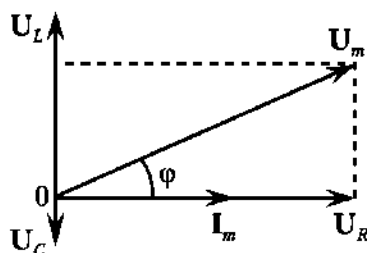


Рис. 7.8

Первое выражение (7.54) похоже на закон Ома (5.37), в котором знаменатель содержит три компонента. В их числе — R , которое называют **активным сопротивлением**. Поскольку напряжение U_R пропорционально силе тока (7.53), то

$$U_R = U_{Rm} \cos(\omega t - \varphi), \quad U_{Rm} = RI_m. \quad (7.56)$$

Как следует из этого выражения, переменный ток, текущий через активное сопротивление, имеет те же частоту и фазу, что и напряжение на нем. Следовательно, на векторной диаграмме (см. рис. 7.8) направления векторов, обозначающих I_m и U_{Rm} , совпадают (см. также параграф 8.1).

Напряжение на конденсаторе:

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{q_m}{C} \cos(\omega t - \alpha) = \frac{q_m}{C} \cos\left(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{I_m}{\omega C} \cos\left(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}\right),$$

где использованы соотношения (7.49), (7.53) и (7.54). Как видим, напряжение U_C отстает по фазе от силы тока на $\pi/2$ (см. рис. 7.8), а его амплитуда

$$U_{Cm} = I_m X_C \quad (7.57)$$

где параметр

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (7.58)$$

придает выражению (7.57) форму закона Ома. X_C называют **реактивным емкостным сопротивлением**, или просто **емкостным сопротивлением**.

ВОПРОС. Чем объяснить уменьшение X_C с ростом частоты?

ОТВЕТ. Возрастает скорость изменения напряженности электрического поля, т.е. емкостного тока смещения.

Напряжение на катушке индуктивности равно

$$U_L = \frac{Ldi}{dt} = -I_m \omega L \sin(\omega t - \varphi) = I_m \omega L \cos\left(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}\right).$$

Как видим, оно опережает по фазе силу тока на $\pi/2$ (см. рис. 7.8), а его амплитуда

$$U_{Lm} = I_m X_L, \quad (7.59)$$

где параметр

$$X_L = \omega L \quad (7.60)$$

также придает выражению (7.59) форму закона Ома. X_L называют **реактивным индуктивным сопротивлением**, или просто **индуктивным сопротивлением**.

ВОПРОС. Почему, в отличие от X_C , X_L растет с ростом частоты?

ОТВЕТ. Возрастает ЭДС самоиндукции, *препятствующая* изменениям тока. Как следует из рис. 7.8, амплитуда полного напряжения

$$U_m = \sqrt{U_{Rm}^2 + (U_{Lm} + U_{Cm})^2} = \sqrt{I_m^2 R^2 + I_m^2 (X_L + X_C)^2} = I_m \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}. \quad (7.61)$$

Это выражение — **закон Ома для цепи переменного тока**. Здесь величина

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (7.62)$$

называется **полным сопротивлением**, или **импедансом**, цепи переменного тока, а составляющая, равная разности $X_L - X_C$ — ее **реактивным сопротивлением**.

Как видим, даже *последовательно включенные* емкостное и индуктивное сопротивления складываются с *разными знаками*, компенсируя друг друга. Если же $X_L = X_C$, то полное сопротивление определяется только активной составляющей импеданса.

ВОПРОС. При каком условии это выполняется?

ОТВЕТ. Приравнивая выражения (7.58) и (7.60), получаем $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, т.е. $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} = \omega_0$. Как следует из формулы (7.52), это условие резонанса (при малом затухании)! Как ясно из формулы (7.55), при этом $\varphi = 0$.

При резонансе полное напряжение совпадает по фазе с током, а полное сопротивление контура равно его активному сопротивлению.

Один из основных вопросов эксплуатации электро- и радиотехнических устройств — потребляемая ими мощность:

$$P = UI = U_m \cos(\omega t) \cdot I_m \cos(\omega t - \varphi) = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi + \frac{1}{2} I_m U_m \cos(2\omega t - \varphi), \quad (7.63)$$

где последнее выражение — результат преобразования произведения косинусов.

Для потребителя важно среднее по времени значение мощности. Поскольку последний член формулы (7.63) изменяется во времени по закону косинуса, его среднее значение равно нулю, а первый член правой части от времени вообще не зависит. Следовательно,

$$\bar{P} = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi. \quad (7.64)$$

Таким образом, при переменном токе потребляемая мощность зависит не только от амплитуд тока и напряжения, но и от *сдвига фаз φ между ними!* Поэтому $\cos \varphi$ называют **коэффициентом мощности**. При $\varphi = 0$ $\cos \varphi = 1$, $Z = R$ и на основании формул (7.64) и (7.54)

$$\bar{P} = \frac{I_m U_m}{2} = \frac{I_m^2 R}{2} = \frac{U_m^2}{2R}. \quad (7.65)$$

Итак, в отношении потребляемой (в среднем) мощности переменный ток действует точно так же, как постоянный, имеющий значения

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (7.66)$$

Эти выражения называют **действующим значением силы тока и действующим значением напряжения**. Большинство электроизмерительных приборов переменного тока измеряет именно эти значения. Их определяют по втягиванию ферромагнитного сердечника в катушку, по которой течет переменный ток, или по температуре нагреваемого им резистора.

Как следует из формулы (7.64), при уменьшении $\cos \varphi$ эффективность использования источников переменного тока возрастает. На практике угол φ формируется главным образом *индуктивностями* электродвигателей, электромагнитов и других намоток. Поэтому на предприятиях стремятся уменьшать число машин, работающих на холостом ходу, а также применяют *компенсирующие емкости*.

7.7. Кинематика волновых процессов

Всякое действие есть *взаимодействие*: если среда воздействует на колебательную систему, *рассеивая* ее энергию, то и система воздействует на среду, *сообщая* ей энергию. Более того, это часто и является *целью* применения колебательных систем.

Удар по торцу металлического стержня смещает ближайшие к нему атомы, а те воздействуют на более отдаленные. Упругость среды вызывает периодические локальные деформации, направленные на возврат к состоянию равновесия. Это приводит к распространению чередующихся растяжений и сжатий. Таким же образом колебания мембраны динамика или голосовых связок вызывают чередующиеся сгущения и разрежения воздуха, которые *рассасываются* вследствие диффузии.

Процесс распространения колебаний в среде называется **волной**.

Частицы среды вместе с волной *не движутся*, а колеблются *на месте* относительно собственных положений равновесия — распространяется лишь

возмущение среды. Если ее частицы колеблются вдоль направления распространения колебаний, то волна называется **продольной**, а если перпендикулярно к этому направлению, то **поперечной**. Поскольку газы и жидкости упругостью сдвига не обладают, в них могут распространяться только продольные волны. Некоторое исключение составляют поперечные волны на поверхности воды, вызванные силами тяготения и поверхностного натяжения. В твердых телах могут возбуждаться как продольные, так и поперечные волны.

Пусть в плоскости $x = 0$ поперечные или продольные смещения s точек среды относительно их положения равновесия соответствуют гармоническим колебаниям (рис. 7.9):

$$s(0, t) = A \cos(\omega t + \varphi_0).$$

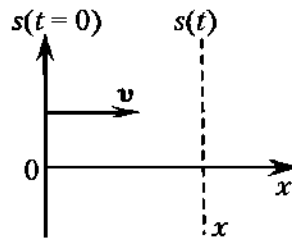


Рис. 7.9

Чтобы дойти до плоскости x , волне требуется время $\tau = x/v$, где v — скорость ее распространения. Следовательно, τ — это *время запаздывания* колебаний частиц в плоскости x по отношению к плоскости $x = 0$:

$$s(x, t) = A \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \varphi_0 \right]. \quad (7.67)$$

Если при $x = 0$, $t = 0$ колебания в источнике начинаются с фазы φ_0 , то в сечении с координатой x они начнутся в момент $t = x/v$. Это же относится и к любой другой фазе колебаний. Поэтому v имеет смысл *скорости перемещения фазы колебаний*, или **фазовой скорости**.

Поверхность, до которой дошли колебания, называют **фронтом волны**. Позади фронта — пространство волны, перед фронтом — пространство, в котором она пока отсутствует. Поверхность волны, точки которой колеблются в одинаковых фазах, называется **волновой**, или **фазовой**, **поверхностью**. Ее форма зависит от конфигурации источника и свойств среды. Если волна исходит от *точечного* источника, а среда *изотропна* (однородна), то скорость ее распространения по всем направлениям одинакова. Тогда на расстояниях r от источника фазы колебаний совпадают и, следовательно, волновая поверхность является **сферической**.

Если фаза волны зависит только от одной координаты, то волновая поверхность называется **плоской**. Может показаться, что ее реализация невозможна, так как на достаточном удалении всякий источник становится точечным. Однако при этом радиус сферы уже так велик, что небольшую ее часть можно рассматривать как плоскость.

Голландский физик Х. Гюйгенс (1629—1695) сформулировал принцип, названный его именем. **Принцип Гюйгенса** гласит: *каждую точку волнового фронта можно рассматривать как источник вторичных волн, а их огибающая определяет положение следующего волнового фронта*.

Этот принцип наглядно иллюстрируют перпендикулярные поверхности воды штыри, через которые проходит поверхностная волна.

Пользуясь формулой (7.9), уравнение (7.67) можно представить в виде

$$s = A \cos\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi x}{vT} + \varphi_0\right) = A \cos\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi x}{\lambda} + \varphi_0\right). \quad (7.68)$$

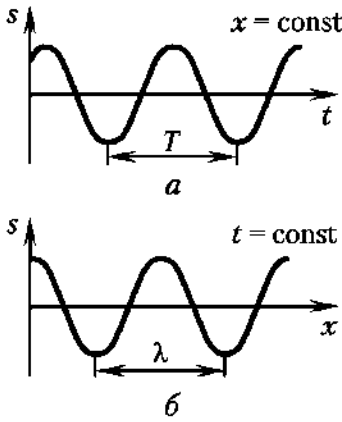


Рис. 7.10

Здесь s проявляется как периодическая функция и t , и x , т.е. существует не только временной (T), но и *пространственный период колебаний*. Его можно определить исходя из того, что значения косинуса повторяются через 2π . Из условия $2\pi x/\lambda = 2\pi$ получаем повторение фазы *в пространстве* через $x = \lambda = vT$ (рис. 7.10).

Минимальное расстояние между точками с одинаковыми фазами колебаний, называется *длиной волны*.

Введем полезное обозначение, названное **волновым числом**:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v}. \quad (7.69)$$

Оно придает уравнению (7.68) симметричный вид в отношении t и x :

$$s = A \cos(\omega t - kx + \varphi_0). \quad (7.70)$$

Интересно, что в полученных выражениях не фигурируют никакие признаки реальных физических процессов, т.е. они относятся к волнам *любой природы*, однако природа волны определяет ее характеристики и результаты ее воздействия.

Механические колебания в источнике порождают **звуковые волны**. Их скорость можно оценить исходя из физических соображений и размерности (прием, практикуемый в физике). Скоростные характеристики частиц определяются силой и массой, в твердом теле — модулем Юнга E , кг/(м·с²), характеризующим упругую силу, и плотностью ρ , кг/м³. Единственная их комбинация, приводящая к размерности скорости:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (7.71)$$

Подобные соображения для звуковой волны в газах приводят к фазовой скорости

$$v = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}, \quad (7.72)$$

где γ — коэффициент Пуассона (показатель адиабаты); R — молярная газовая постоянная; p , ρ , M , T — давление, плотность, молярная масса и температура газа в отсутствие волны. В стали $v = 5100$ м/с, а в воздухе при нормальных условиях $v \approx 340$ м/с.

Если тело, например снаряд, движется со скоростью меньшей, чем задана по формуле (7.72), то вызванный им звук представляет собой чередова-

ние уплотнений и разрежений газа, которые успевают от снаряда «убежать». Если же скорость снаряда больше скорости звука, то уплотнения перед снарядом рассасываются не успевают и возникает их набегание друг на друга. Это создает **ударную волну** весьма уплотненного воздуха. На ее формирование и преодоление снаряд тратит существенно большую энергию, чем при дозвуковых скоростях. Фронт ударной волны, образованной снарядом или самолетом, имеет вид конуса.

Примеры практики

Ударные волны, особенно вызванные ядерным взрывом или так называемой вакуумной бомбой, приводят к большим разрушениям.

В созидательных целях используют не только слышимый, но и *ультразвук*. Его применяют для получения трехмерных изображений внутренних органов человека или для воздействия на вещество. При достаточной интенсивности звук может нарушить сплошность жидкости. В ней возникают пузырьки, которые в фазе сгущения схлопываются и создают импульсы гидродинамического возмущения. Они приводят к разогреву, выделению пара, ускорению химических реакций и т.д. Это явление называется **кавитацией**. Тот же механизм позволяет получать очень тонкие порошки и эмульсии, дробить камни в почках, очищать металлы от жира и ржавчины, упрочнять стали и сплавы, производить резание, шлифование, сверление и другие технологические операции.

Важна и *инфразвук*. С его помощью осуществляется коммуникация в животном мире (киты, слоны), он информативен при землетрясениях и ураганах, а при достаточных мощностях даже используется в качестве оружия, так как негативно действует на человека.

7.8. Электромагнитные волны

Если растягивать витки катушки и раздвигать пластины конденсатора, то электромагнитные колебания выйдут за пределы колебательного контура. Таким образом, контур можно «развернуть» в **вибратор** (антенну) в виде прямолинейного провода, по которому индуктивность и емкость *равномерно распределены*. Сместившийся вдоль антенны заряд изменяет конфигурацию электромагнитного поля, но на расстоянии от антенны это происходит не сразу. Скорость распространения возмущения определяется здесь цепью взаимопревращений: переменное электрическое поле (ток смещения) вызывает появление переменного магнитного поля, оно, в свою очередь, порождает вихревое электрическое поле и т.д.

Первый вибратор, излучающий предсказанные Дж. Максвеллом электромагнитные волны, и их приемник создал немецкий физик Г. Герц. Он обнаружил, что эти волны, как и свет, отражаются, преломляются и поляризуются, что указывало на электромагнитную природу света.

Уравнения (6.42), (6.43), следующие из уравнений Максвелла, позволяют *количественно* проанализировать сцепленные друг с другом электрическое и магнитное поля. В математическом отношении они представляют собой *волновые уравнения*, поскольку их решения имеют такой же вид, как уравнение (7.67), т.е. описывают волну:

$$E = E_m \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \alpha \right], \quad H = H_m \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \alpha \right], \quad (7.74)$$

где фазы колебаний векторов \mathbf{E} и \mathbf{H} одинаковы, а фазовая скорость

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{n}, \quad c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.} \quad (7.75)$$

Последнее справедливо для вакуума (или воздуха), у которого $\mu = \epsilon = 1$ и потому $v = c$. Именно так решение системы уравнений Максвелла обнаруживает *электромагнитную природу света*, представление о которой высказывали еще Р. Гук, а также Х. Гюйгенс, Г. Х. Эрстед и М. Фарадей.

Характеристика среды $n = \sqrt{\epsilon \mu}$ называется **абсолютным показателем преломления**. Он характеризует **оптическую плотность среды**.

Используя волновое число $k = 2\pi/\lambda = \omega/v$, получим формулы (7.74) в виде

$$E = E_m \cos(\omega t - kx + \alpha), \quad H = H_m \cos(\omega t - kx + \alpha). \quad (7.76)$$

Французский оптик О. Ж. Френель (1785—1827) установил поперечность световых волн. Векторы \mathbf{E} и \mathbf{H} перпендикулярны друг другу и вектору \mathbf{v} фазовой скорости волны, составляя **правовинтовую тройку** (рис. 7.11).

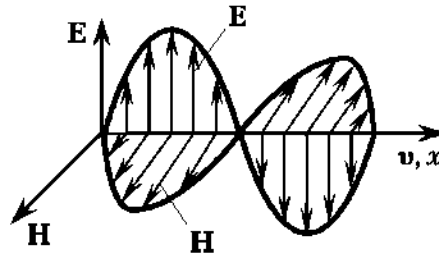


Рис. 7.11

Порожденная антенной электромагнитная волна становится независимым от нее видом материи, способным взаимодействовать с различными объектами, и в зависимости от их природы это взаимодействие может приводить к тем или иным результатам. Плотность энергии w волны есть сумма плотностей энергии ее электрической и магнитной составляющих: $w = w_E + w_H = \epsilon \epsilon_0 E^2 / 2 + \mu \mu_0 H^2 / 2$, а распределение энергии между ними соответствует ее распределению в источнике, где их максимальные значения равны. Учитывая, что колебания векторов \mathbf{E} и \mathbf{H} в волне происходят в фазе, равенство энергий выполняется и в их текущих значениях: $\epsilon \epsilon_0 E^2 / 2 = \mu \mu_0 H^2 / 2$. Тогда суммарная плотность энергии с учетом формулы (7.75) составит

$$w = \epsilon \epsilon_0 E^2 = \mu \mu_0 H^2 = EH \sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0} = \frac{EH}{v}. \quad (7.77)$$

Вообразим цилиндр с площадью основания ΔA , ось которого совпадает с направлением фазовой скорости \mathbf{v} волны. Если длина его образующей $v \Delta t$, где $\Delta t \gg T$, то за время Δt через основание цилиндра пройдет вся заключенная в нем энергия $\Delta W = w v \Delta t \Delta A$. Тогда интенсивность волны с учетом соотношения (7.77) составит

$$S = \frac{\Delta W}{\Delta t \Delta A} = w v = EH. \quad (7.78)$$

Как следует из формулы (7.78), интенсивность волны выражается в *ваттах на квадратный метр* ($\text{Вт}/\text{м}^2$). Так как направление потока энергии сов-

падает с направлением вектора \mathbf{v} фазовой скорости волны, *векторы* \mathbf{E} , \mathbf{H} и \mathbf{S} также составляют правовинтовую тройку:

$$\mathbf{S} = [\mathbf{E}, \mathbf{H}]. \quad (7.79)$$

Вектор \mathbf{S} назван **вектором Пойнтинга** — по имени английского физика Д.-Г. Пойнтинга (1852—1914). Результат воздействия электромагнитной волны зависит от объекта воздействия и длины волны, которая варьирует в огромном диапазоне от $\sim 10^5$ м (длинные радиоволны) до $< 10^{-11}$ м (гамма-лучи).

Восприятие энергии света определяется **фотометрией**, основоположник которой — французский физик П. Бугер (1698—1758) (фотометрические характеристики изучаются в лабораторном практикуме).

Световой поток через площадку dA равен

$$d\Phi = \mathbf{S}dA = SdA\cos\alpha,$$

где α — угол между вектором \mathbf{S} и внешней нормалью \mathbf{n} к площадке.

Освещенность — это световой поток, падающий на единицу площади:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = S\cos\alpha. \quad (7.80)$$

Сила света — это световой поток в пределах единичного телесного угла:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}. \quad (7.81)$$

Единица силы света — **кандела** (кд) — одна из основных единиц СИ, определяемая специальным эталоном. В свою очередь, она определяет единицу светового потока **люмен** (лм): $1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \cdot 1 \text{ ср}$ — это световой поток, излучаемый изотропным источником с силой света 1 кд в пределах единичного телесного угла в 1 ср (стерадиан). Люмен — аналог ватта в оптическом диапазоне. Единицей освещенности является **люкс** (лк) — освещенность, которая создается световым потоком 1 лм на площади поверхности 1 м^2 : $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм}/1 \text{ м}^2$. Освещенность поверхности определяет условия работы человека на производстве, в полевых условиях и т.д.

ВОПРОС. Как определить освещенность через силу света?

ОТВЕТ. Для изотропного источника $I = \Phi/4\pi$. Поэтому

$$E = I\cos\alpha/R^2. \quad (7.82)$$

Как видим, один и тот же источник света создает разные освещенности поверхности в зависимости от угла α . Значения фотометрических величин определены нормативами, связанными с физиологией зрения. На транспорте, например, они реализуются фарами, отражателями, сигналами поворота, освещением приборной доски. В военном деле они важны при решении проблем маскировки и демаскировки и т.д.

Жизнь требует не только энергии, но и *информации*, и она — в волновой форме — непрерывно поступает и обрабатывается организмами. Человеческий глаз вырезает из диапазона электромагнитных волн узкую область $\lambda \approx (0,4 \div 0,7) \cdot 10^{-6}$ м, в которой получает 90% информации об условиях существования хозяина этого органа рецепции. Есть существа, видящие больше,

чем человек, или иначе, чем человек. Рыбы в основном плохо видят красный и желтый цвета, зато хорошо видят сине-зеленый и даже ультрафиолетовый спектры. Ультрафиолетовое излучение воспринимают бабочки и пчелы, инфракрасное — гремучая змея, осьминог видит все в одном цвете, а креветка Мантис видит гораздо более широкий спектр, чем человек. У человека нет глаз креветки, но есть орган, способный расширить возможности любого другого органа. Это — центральная нервная система (головной мозг).

7.9. Эффект Доплера

Первый этап получения информации состоит в том, что часть волны проникает в приемник, а часть отражается, и отраженная волна позволяет судить о наличии приемника. Летучие мыши, кроты и дельфины (во всех трех земных средах) пользуются специальными органами, излучающими и принимающими ультразвуковой сигнал. Человек делает то же самое при звуковой и радиолокации.

Исторический экскурс

Начало радиолокации связано с именем А. С. Попова: 7 мая 1895 г. он продемонстрировал усовершенствованные передатчик и приемник Г. Герца, и этот день стал в России «Днем радио». В 1897 г. во время экспериментов по радиосвязи между кораблями А. С. Попов обнаружил отражение радиоволн. На вооружение Советской армии серийные радары поступили в 1939 г., а во время Второй мировой войны ими уже широко пользовались, например при обороне Москвы и городов Англии. В настоящее время существует целый спектр наземных, морских, воздушных и космических носителей радиолокационных станций (РЛС).

Примеры практики

Всякая РЛС содержит передатчик, антенну и приемник. Антенна излучает короткий сфокусированный импульс (~ 1 мкс), получает его часть, отраженную от цели, и передает в приемник. Тот усиливает принятый сигнал и передает, например, на электронно-лучевую трубку (ЭЛТ), горизонтальная развертка которой запускается синхронно с импульсом передатчика. Поэтому пауза t между началом развертки и меткой на экране определяет дальность цели R : $2R = ct$. Таким же образом по положению антенны относительно начала отсчетов (меридиана и горизонта) определяют азимут и угол места цели.

Амплитуда принимаемых сигналов должна быть не ниже порога чувствительности приемника, что определяет мощность генератора и предельную дальность обнаружения цели. При мощности точечного генератора P_r , равномерно излучающего по всем направлениям, поток мощности, падающий на единичную площадку цели, находящейся на расстоянии R , составляет $P_d \sim P_r / (4\pi R^2)$. Обычно излучение сосредоточено в узком секторе, формируемом антенной. Тогда зависимость его мощности от расстояния определяется площадью сферического сегмента, но остается квадратичной (с другим коэффициентом пропорциональности). Мощность P_p , рассеиваемая целью, определяется такой же зависимостью. В итоге на единицу площади приемника поступает мощность отраженного сигнала $P_{np} = P_r / (4\pi R^2)^2$. КПД, как видим, ничтожный, причем чтобы повысить R вдвое, мощность P_r передатчика нужно повысить в 16 раз. Это привело к разработке РЛС с мощностями до ~ 10 МВт в импульсе, при которых в технике возникают неуправляемые разряды, а люди подвергаются лучевым болезням. Поэтому мощности передатчиков вынужденно понизили, но ввели при этом более сложное кодирование сигнала, позволяющее распознавать его на фоне помех.

В 1842 г. австрийский физик и астроном Х. Доплер (1803–1853) обнаружил эффект, на основе которого можно определять относительную скорость объектов. Он состоит в том, что частота волны, принимаемой приемником, зависит от относительного движения приемника и источника, излучающего волну с частотой ν_0 . Частота $\nu_{\text{пр}}$ колебаний в приемнике равна числу длин волн, достигающих его за 1 с. Поскольку за это время волна проходит расстояние, равное ее фазовой скорости v_ϕ , то $\nu_{\text{пр}} = v_\phi/\lambda = v_\phi/v_\phi T = \nu_0$, где использовано $\lambda = v_\phi T$ (T — период колебаний). Если *приемник* движется к источнику со скоростью $v_{\text{пр}}$, то за 1 с он «поглощает» больше длин волн на величину $v_{\text{пр}}/\lambda$. Следовательно, $\nu_{\text{пр}} = v_\phi/\lambda \pm v_{\text{пр}}/\lambda = (1 \pm v_{\text{пр}}/v_\phi)\nu_0$, где знак « \pm » относится к случаю удаления приемника от источника.

Пусть теперь *источник* движется к приемнику со скоростью $v_{\text{ист}}$. В этом случае изменяется сама длина волны λ . Если при неподвижном источнике за период T фаза волны распространяется на $\lambda_0 = v_\phi T$, то движение источника «уплотняет» это расстояние до $\lambda = v_\phi T - v_{\text{ист}} T$ (рис. 7.12).

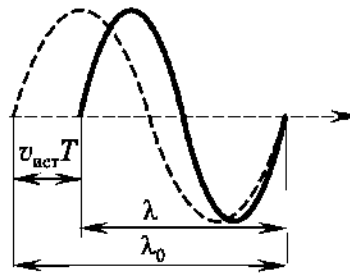


Рис. 7.12

Соответственно, $\nu_{\text{пр}} = v_\phi/\lambda = v_\phi/(v_\phi \mp v_{\text{ист}})T = v_\phi \nu_0/(v_\phi \mp v_{\text{ист}})$, где знак « \mp » относится к случаю удаления источника от приемника. Обобщая оба случая, получаем

$$\nu_{\text{пр}} = \frac{1 \pm v_{\text{пр}}/v_\phi}{1 \mp v_{\text{ист}}/v_\phi} \nu_0 \quad (7.83)$$

Формула (7.83) свидетельствует, что при сближении источника и приемника, воспринимаемая приемником частота, например звуковой волны, растет, а при взаимном удалении — уменьшается, что проявляется в сигнале проезжающего мимо автомобиля или поезда.

Для электромагнитной волны этот эффект наблюдается и в отсутствие среды — важно лишь относительное движение источника и приемника. Если v — скорость их сближения (по линии, соединяющей источник и приемник), то с учетом релятивистского эффекта формула (7.83) приобретает вид

$$\nu_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{1 \pm \beta}{1 \mp \beta}} \nu_0 \approx \nu_0 (1 \pm \beta), \quad (7.84)$$

где $\beta = v/c$. Эффект Доплера позволяет измерять скорость v движения воздушных, подводных, наземных и космических объектов, излучающих собственную волну или отражающих волну РЛС. В последнем случае в результате переизлучения волны металлической обшивкой движущегося объекта смещение частоты удваивается. Уменьшение частоты света при удалении его источника объясняет так называемое красное смещение спектра галактик и звезд. Его обнаружил в 1929 г. американский астроном Э. Хаббл (1889–1953),

подтвердив тем самым предсказание советского теоретика А. А. Фридмана (1888—1925) о расширении Вселенной.

Примеры практики

Эффектом Доплера пользуются в ГИБДД (ВАИ) для определения скорости движения автомобилей. Во время Великой Отечественной войны опытные солдаты на слух (по частоте звука) оценивали степень опасности подлетающего снаряда. Современная радиолокация отличается всевозможными ухищрениями: разные режимы поиска целей и наведения ракет, разного рода пассивные и активные помехи со стороны обнаруживаемых бортов, выведение из строя РЛС противника средствами, направленными по лучу станции. Защита от РЛС состоит также в уменьшении отражения от собственных бортов за счет поглощающих покрытий и уменьшения эффективной поверхности рассеяния, определяемой размером и формой объекта. По программе «Стелс» в США разработаны самолеты, напоминающие формой электрического ската и имеющие особую структуру поверхности. Подобной техникой располагает и отечественная авиация.

7.10. Волна как носитель информации

Волна одной частоты называется **монохроматической** (от греч. *monos* — один, *chroma* — цвет). Название происходит от *оптического* диапазона электромагнитных волн, в котором такая волна воспринимается глазом как определенный *цвет*. Цвет свидетельствует лишь о наличии источника волны. Однако человеческий глаз ориентирован на более богатую информацию. Если зафиксировать глазное яблоко и веки, то через некоторое время глаз вообще перестает воспринимать свет с постоянными частотой, амплитудой и фазой. То же относится и к другим органам рецепции — уху, воспринимающему звук, коже, воспринимающей температуру. Глазное яблоко и веки постоянно движутся, поскольку глаз воспринимает сигналы только с *переменными параметрами*, т.е. *модулированными*. Ими в избытке снабжает его естественная и искусственная природа.

Простейший вариант искусственной модуляции описан выше: короткий импульс РЛС используется в качестве *временной метки*. Такие импульсы применяют для локации планет, военных целей, неисправностей в кабеле, раковин в изделиях и т.д. Локация земной коры позволяет определять характер залегания пород, расстояние до выстрелившего орудия, эпицентра землетрясения или ядерного взрыва. Слоны сообщают сородичам об опасности, стуча ногами о землю. Такой сигнал распространяется гораздо дальше, чем трубный крик, — на многие километры.

Рукотворный *сейсмодатчик* применяют в минах. Он реагирует на приближение цели по колебанию грунта и включает другие датчики. Чувствительность некоторых мин позволяет им реагировать не только на бронетехнику, но и на шаги сапера на расстоянии ~10 м, поэтому они недоступны даже при обнаружении. Своеобразную локацию применяют и в *миноискателе* (точнее — в металлоискателе). Генерируемая им электромагнитная волна практически беспрепятственно проходит через диэлектрик, а от металла отражается — токи Фуко порождают вторичную волну. Отраженный сигнал усиливается приемником и преобразуется в звуковой или световой. Аналогично работает и радиовзрыватель: реагируя на цель на заданном от

нее расстоянии, он производит подрыв боевой части ракеты или зенитного снаряда.

Сам по себе импульс локатора информационно беден — он лишь косвенно использует сложную дополнительную информацию о законах движения объектов, тактической обстановке и т.д. В то же время *организованная совокупность* импульсов может уже и сама по себе быть носителем информации. Например, детальная радиолокация земной поверхности позволяет выявить рельеф местности, в том числе объекты военного назначения. При этом различить перепады высоты деталей можно, если разность фаз отраженных радиоволн не менее $\pi/2$.

ВОПРОС. Какие минимальные перепады высоты способно регистрировать бортовое радиолокационное устройство, если частота передатчика ν ?

ОТВЕТ. Разность фаз в $\pi/2$ соответствует сдвигу в $\lambda/4$. Поскольку $\lambda = c/\nu$, то критерий различимости высот $\Delta h = c/(4\nu)$.

В этом случае модуляцию сигнала производит рельеф местности — подобно тому как видимые поверхности модулируют свет, попадающий затем в глаз. Применяют и искусственное кодирование радиосигнала, например в радиовзрывателях. Такую команду можно точно вычлнить на фоне случайных помех — импульсов от разного рода генераторов, силовых установок и т.п.

В животном мире природная коммуникация осуществляется путем модуляции звука в гортани. В военном деле электромагнитные волны служат средством передачи информации и дезинформации путем радио-, телевизионной и телефонной (мобильной) связи. Этому сопутствуют способы и средства добывания и сокрытия информации путем устранения физических утечек электромагнитных волн, применения шифровки и дешифровки и т.д.

Исторический экскурс

В 1838 г. американский изобретатель и художник С. Морзе продемонстрировал *телеграфную модуляцию*, основанную на варьировании длительности импульсов и пауз между ними. В соответствии с азбукой Морзе буквы алфавита составляют путем сочетания «точек» (импульс длительностью Δt) и «тире» (импульс длительностью $3\Delta t$). В 1896 г. радиотрансляцию такого рода продемонстрировал А. С. Попов. Например, буква «С» в русском языке выглядит в такой азбуке как три точки. То же число «три» легло в основу радиосигнала, означающего призыв о помощи: три тире — три точки — три тире. Внедрение его в практику сразу же помогло спасти на море многие жизни. Поскольку в английском алфавите такой сигнал эквивалентен буквам SOS (буква S передается также тремя точками), ему приписали потом и содержание: *save our souls*, т.е. «спасите наши души». И все же возможности азбуки Морзе весьма ограничены: она дает лишь *условное* обозначение букв и не может передать, например, тембр человеческой речи, код которой основан на сочетании разных частот.

Монохроматическую *звуковую* волну в диапазоне частот 20—20 000 Гц ухо воспринимает как **простой тон**. Волны с частотами $\nu < 20$ Гц называют **инфразвуком**, а с $\nu > 20$ кГц — **ультразвуком**. Чем больше частота слышимого звука, тем больше **высота тона**. Волна может содержать и **спектр** частот. Набор отдельных частот называют *линейчатым* спектром, если же час-

тоты сигнала непрерывно заполняют некоторый их интервал, то спектр называют *сплошным*. Ему соответствует шум.

Чтобы звук был слышен ухом, его интенсивность J должна быть больше некоторого предела J_0 , который называется **порогом слышимости**. Для самого распространенного диапазона частот $(1 \div 4) \cdot 10^3$ Гц чувствительность уха очень велика: $J_0 \approx 10^{-12}$ Вт/м². Отношение J/J_0 ощущается ухом как **громкость**. **Уровень громкости L** определяют логарифмической функцией, которая растет медленнее, чем J/J_0 :

$$L = 10 \lg \left(\frac{J}{J_0} \right). \quad (7.85)$$

Единица L названа **децибелом (дБ)** — по имени шотландского изобретателя телефона А. Белла (1847—1922). В отсутствие коэффициента 10 единица называется **белом**. Громкость обычной речи — ~60 дБ, а при 120 дБ (двигатель самолета) ухо почти не слышит, но ощущает боль, т.е. воспринимаемая ухом интенсивность звука имеет не только нижний, но и верхний предел. При взрыве светошумовой гранаты уровень громкости еще выше и вызывает шок.

Если содержание сигнала основано на *непрерывном изменении* амплитуды, частоты или фазы волны, то его называют **аналоговым**. Поскольку на большие расстояния звук не распространяется, им модулируют **электромагнитную** волну, используемую как *носитель* сигнала, а в приемнике модулирующую волну снимают.

Модуляция сигнала, т.е. сложение гармонических колебаний с разными частотами, амплитудами и фазами, может придать ему любой вид. В простейшем случае это высокочастотное колебание, амплитуда которого изменяется с гораздо меньшей частотой. Рассуждая наоборот, можно представить колебание любой формы как *суперпозицию гармонических колебаний разных частот*. В соответствии с методом французского физика и математика Ж. Б. Ж. Фурье (1768—1830), участника египетского похода Наполеона, любая периодическая функция $f(t)$ может быть разложена в ряд:

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1) + A_2 \cos(2\omega_0 t + \varphi_2) + A_3 \cos(3\omega_0 t + \varphi_3) + \dots, \quad (7.86)$$

в котором $\omega_0 = 2\pi T^{-1}$, где T — период функции f . Фурье получил его, рассматривая распространение теплоты по железному кольцу корабельного якоря, однако впоследствии выяснилось, что такой метод позволяет разложить сигнал любой природы и любой формы на гармонические составляющие (гармоники). Это открытие оказалось удивительно мощным средством анализа. Оно отражает и *реальность*: физические системы действительно вычленяют в сложных сигналах гармонические составляющие. Например, неровности дороги вызывают нерегулярные возмущения подвески транспорта, и если в них оказывается гармоническая составляющая, близкая к *собственной частоте* системы, то возникает резонансное раскачивание кузова. Известный пример — разрушение Египетского моста в Петербурге от негармонических, но периодических ударов копыт лошадей и колес повозок.

В разложении Фурье колебание с минимальной частотой ω_0 называют *первой гармоникой*, а колебания с кратными ей частотами $2\omega_0$, $3\omega_0$ и т.д. — *высшими гармониками*. Амплитуды A_1 , A_2 , A_3 , ... гармоник быстро убывают с увеличением их порядка (частоты), поэтому на практике используют лишь

первые члены ряда Фурье. Период сложного колебания совпадает с периодом первой гармоники. Это и оправдывает сделанное в параграфе 7.5 допущение, что вынуждающая сила изменяется по гармоническому закону.

В акустике первую гармонику называют *основным тоном*, а высшие — *обертнами* (от нем. *ober* — верхний). Чем короче струна, тем выше ее тон (то же относится к голосовым связкам). При одинаковом основном тоне и разных обертонах звуки различаются **тембром**. Чем больше в звуке обертонов, тем он «богаче окрашен».

Спектр *шума* выглядит как набор непериодических колебаний, заполняющих некоторый интервал частот. Ресальный сигнал содержит обычно и гармоники, и шум. Если их амплитуды соизмеримы, то в приемных устройствах возникает проблема выделения полезного сигнала на фоне шума (помех). Как уже отмечалось, это важно в радиолокации, где противник специально ставит помехи, чтобы подавить ими полезный сигнал. Поскольку шум сопровождает работу любой техники, то для военной техники уровень шума определяет ее *скрытность*. Головки наведения торпед, например, могут быть настроены на определенный спектр сигналов, исходящих от двигателей кораблей и подводных лодок.

Проблема выделения сигнала в приемнике может быть связана не только с шумом, но и с сигналами многих передатчиков. Каждая радиостанция работает на своей *несущей* частоте ω_0 , которую нагружают модулирующими сигналами низких частот в некотором диапазоне $\Delta\omega \ll \omega$. Ближайшая по частоте станция должна иметь такой спектр, который не перекрывает соседний — иначе они друг другу будут мешать (рис. 7.13). Следовательно, чем больше несущие частоты, тем больше станций можно поместить в канал без взаимного перекрытия. Для одной несущей частоты радиосвязи требуется полоса частот, слышимых ухом (~ 10 кГц). Поэтому несущие частоты, например, военных радиостанций, составляют порядка нескольких десятков мегагерц. Видеоинформация гораздо богаче и требует полосы уже в несколько мегагерц, поэтому несущие частоты $\sim 10^2 - 10^3$ МГц.

Развитие информационной техники требует также повышения скорости передачи информации, а следовательно, ее уплотнения во времени. Это важно, например, для военной разведки. Поэтому вместо радиоволн все чаще используют оптический диапазон с частотой колебаний $\sim 10^{15}$ Гц, что позволяет на много порядков уплотнить информацию и повысить скорость ее передачи. Если при несущей частоте 10^8 Гц (метровый диапазон) могут независимо работать $\sim 10^4$ радиостанций с полосой $\sim 10^4$ Гц, то при несущей частоте 10^{15} Гц их может быть $\sim 10^{11}$! Аналогично увеличиваются емкость телевизионных и телефонных каналов и быстродействие ЭВМ.

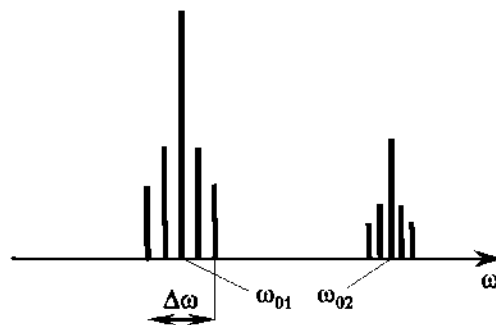


Рис. 7.13

В военном деле радио- и видеосвязь применяют в бортовых и стационарных системах, аккумулирующих локальную, глобальную и космическую информацию. Этому сопутствует улавливание электромагнитного излучения средств противника (радиоэлектронная разведка, подслушивание и т.д.).

Резюме

Подводя итоги настоящей главы, отметим ее основные положения.

Колебания возникают при выведении инерционной системы из положения равновесия и при наличии в ней возвращающей силы. Из-за взаимодействия со средой колебания затухают, возбуждая при этом волны в среде. Волна — это периодический процесс в пространстве и во времени. И колебания, и волны можно поддерживать периодическими внешними воздействиями. Если их частота близка к собственной частоте системы, то возникает резонанс, имеющий как положительные, так и отрицательные последствия.

Колебания и волны разной природы описываются одинаковыми уравнениями с разным физическим содержанием. Они важны как носители энергии и информации об источнике и приемнике волны.

Колебательные и волновые процессы играют огромную роль в природе, науке и технике, в том числе относящейся к ВВТ.

Вопросы для самоконтроля

1. Почему шины автомобиля «визжат» при резком торможении? Почему при некоторой скорости автомобиля изображение в зеркале заднего вида размывается?
2. Два резистора — проволочный и пленочный — имеют одинаковые сопротивления постоянному току. Одинаковая ли мощность выделяется в них при подключении к бытовой электрической сети?
3. Если ножку звучащего камертона приложить к столу, звук становится гораздо сильнее. Не противоречит ли это закону сохранения энергии?
4. Различаются ли частоты вертикальных колебаний нагруженного и ненагруженного автомобиля? При том же грузе, но разном давлении в шинах?
5. Как должен поступить водитель, если при движении по бревенчатому настилу кузов автомобиля начинает колебаться с большой амплитудой?
6. Сравните периоды колебаний для случаев: 1) груз свободно колеблется на тросе; 2) кран поднимает его равномерно вверх; 3) кран поднимает его вверх равноускоренно; 4) опускает его вниз равнозамедленно.
7. Разность частот между посланным и принятым сигналом от одной цели возрастает, а от другой равна нулю. Каков характер движения целей?
8. Как сделать, чтобы метка отраженного сигнала на экране локатора не вышла за пределы его горизонтальной развертки?
9. Отличается ли частота сигнала радиолокатора, определяемая приемником самолета, и отраженного от него сигнала, определяемая приемником локатора?
10. Почему для локации подводных лодок применяют не электромагнитные волны, а ультразвук?

Задачи с решениями

7.1. Гидролокатор подводной лодки, находящейся на глубине 1 км, засек отклик от авианосца противника через 4,2 с после посылки пеленгующего сигнала. Гидролокатор второй подводной лодки, находящейся в другой точке оксана на глубине 1,6 км, получил отклик от того же авианосца через 7 с. Как по этим данным определить координаты авианосца, если скорость звука в воде 1500 м/с?

Дано: $h_1 = 1 \text{ км} = 10^3 \text{ м}$; $h_2 = 1,6 \text{ км} = 1,6 \cdot 10^3 \text{ м}$; $t_1 = 4,2 \text{ с}$; $t_2 = 7 \text{ с}$; $v = 1500 \text{ м/с}$.
 $\Delta h - ?$

Решение. Расстояния от авианосца до лодок определяются выражениями

$$l_1 = v \frac{t_1}{2}, \quad l_2 = v \frac{t_2}{2}.$$

Они позволяют определить расстояния r до цели по горизонтали с учетом глубины погружения лодок (рис. 7.14):

$$r_1 = \sqrt{\left(v \frac{t_1}{2}\right)^2 - h_1^2}; \quad r_2 = \sqrt{\left(v \frac{t_2}{2}\right)^2 - h_2^2}.$$

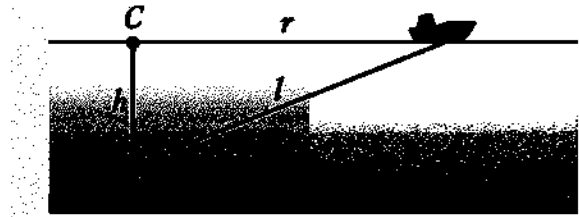


Рис. 7.14

Точка пересечения окружностей с радиусами r_1 и r_2 и центрами C_1, C_2 определяет координаты авианосца.

Подставляя данные, получим $r_1 = 3 \text{ км}$, $r_2 = 5 \text{ км}$.

7.2. Напряжение между отклоняющими пластинами горизонтальной развертки ЭЛТ радиолокатора имеет пилообразную форму: линейно нарастает, а затем резко падает. Таким образом, начало следующей развертки совпадает с окончанием предыдущей. Если период составляет 2 мс, то какова максимальная дальность обнаружения цели?

Дано: $T = 2 \text{ мс} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

$L_{\max} - ?$

Решение. Начало развертки совпадает с моментом излучения зондирующего импульса, который за время не большее, чем время развертки, должен по возвращении образовать метку на экране ЭЛТ. Следовательно, $2L_{\max} \leq cT$, откуда $L_{\max} \leq 0,5cT$.

Подставляя данные, получим $L_{\max} \leq 3 \cdot 10^5 \text{ м}$.

7.3. Кузов грузового автомобиля совершает вертикальные колебания по закону $x = A \cos(\omega t)$ с частотой 2 Гц. В кузове лежит груз из абсолютно неупругого материала. Определим: а) при какой минимальной амплитуде колебаний груз начнет «прыгать»; б) в каких фазах колебаний это будет происходить?

Дано: $x = A \cos(\omega t)$; $\nu = 2 \text{ Гц}$.

$A_{\min} - ?$

Решение. «Прыгание» неупругого груза начнется в случае, если в крайнем верхнем положении кузов начнет обратное движение с ускорением большим, чем g . Найдем ускорение кузова:

$$v = \frac{dx}{dt} = -A\omega \sin(\omega t), \quad a = \frac{dv}{dt} = -A\omega^2 \cos(\omega t).$$

Исходя из условия $A\omega^2 \geq g$ получим

$$A \geq \frac{g}{\omega^2} = \frac{g}{4\pi^2\nu^2},$$

где учтено равенство $\omega = 2\pi\nu$.

Подставляя данные, получим $A \geq 6 \text{ см}$. При этом фаза $\omega t = 2\pi n$, $n = 0, 1, 2, \dots$

7.4. Грузовой автомобиль движется по настилу из бревен диаметром 30 см. При какой скорости автомобиля амплитуда колебаний кузова будет наибольшей, если частота его собственных колебаний $12,6 \text{ с}^{-1}$, а коэффициент затухания $1,6 \text{ с}^{-1}$?

Дано: $d = 30 \text{ см} = 0,3 \text{ м}$; $\omega_0 = 12,6 \text{ с}^{-1}$; $\delta = 1,6 \text{ с}^{-1}$.

$v - ?$

Решение. Подвеска автомобиля получает периодические толчки на вершинах бревен, отстоящих друг от друга на расстоянии их диаметра (рис. 7.15). При движении автомобиля со скоростью v частота воздействия

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{v}{d}, \quad \omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi v}{d}.$$

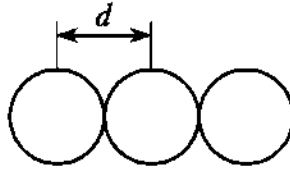


Рис. 7.15

Поскольку резонансная частота $\omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}$, то

$$v = \frac{d\sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}}{2\pi}.$$

Подставляя данные, получим $v = 0,59 \text{ м/с}$.

7.5. При возбуждении собственных колебаний сила тока в колебательном контуре изменяется согласно уравнению $I = -0,1\sin(10^3\pi t)$, А. Максимальная энергия магнитного поля равна 10^{-2} Дж. Найдём амплитуду напряжения на конденсаторе.

Дано: $I = -0,1\sin(10^3\pi t)$, А; $W_{Lm} = 10^{-2}$ Дж.

$U_{Cm} - ?$

Решение. Искомая амплитуда определяет максимальную энергию электрического поля, которая равна максимальной энергии магнитного поля:

$$\frac{CU_{Cm}^2}{2} = W_{Lm}, \quad U_{Cm} = \sqrt{\frac{2W_{Lm}}{C}},$$

где C — ёмкость конденсатора, а W_{Lm} определяется выражением

$$W_{Lm} = \frac{LI_m^2}{2}.$$

где, по условию, $I_m = 0,1$ А. Неизвестные индуктивность L и ёмкость C определяют собственную частоту контура, которая следует из уравнения для тока: $\omega_0 = 10^3\pi$. Имеем

$$\omega_0 = \frac{1}{LC}, \quad C = \frac{1}{\omega_0^2 L}, \quad L = \frac{2W_{Lm}}{I_m^2}.$$

Таким образом,

$$U_{Cm} = \sqrt{\frac{2W_{Lm} \cdot 2W_{Lm} \cdot \omega_0^2}{I_m^2}} = \frac{2W_{Lm}\omega_0}{I_m}.$$

Подставляя данные, получим $U_{Cm} = 628 \text{ В}$.

Задачи для самостоятельного решения

7.6. Морской сигнал бедствия передают на частоте 2182 кГц в течение 2 с с паузой 8 с, затем он повторяется. Сколько длин волн несущей частоты укладывается в волновом пакете, определяемом периодом сигнала?

7.7. Самолет летит со скоростью 900 км/ч в направлении к локатору, излучающему сигнал частотой 600 МГц. На сколько отличается от нее частота сигнала, воспринимаемого: а) приемником самолета; б) приемником локатора?

7.8. Радиолокатор рассчитан на максимальную дальность обнаружения цели 100 км. Какова у него частота посылок импульсов? Какова минимальная дальность обнаружения цели радиолокатором, если длительность зондирующего импульса 0,8 мкс?

7.9. За один период амплитуда колебаний стрелки измерительного прибора уменьшилась в 1,93 раза. Через сколько периодов амплитуда составит 1% от первоначальной?

7.10. Цепь, подключенная к источнику напряжения частотой 50 кГц, содержит последовательно соединенные резистор сопротивлением 2 Ом, конденсатор емкостью 25 нФ и катушку с индуктивностью 100 мкГн. Во сколько раз амплитуда напряжения на конденсаторе больше амплитуды напряжения источника?

Глава 8

ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

Любители щелей заменили доски заповедей штакетником законов.

В результате изучения данной главы учащийся должен:

знать

- эмпирические основания, основные понятия, модели и положения волновой оптики;

- физическую сущность когерентности и законы интерференции и дифракции волн в различных проявлениях;

- физическую сущность и законы отражения, преломления, геометрической оптики, рассеяния, поглощения и поляризации волн;

уметь

- распознавать, вычленять и анализировать проявления закономерностей волновой оптики в изучаемых объектах природы и техники;

- формулировать изучаемую научно-техническую задачу с позиций законов волновой оптики и применять аппарат теории для ее решения;

владеть

- навыками применения законов волновой оптики при решении научно-технических задач, сформулированных как физические;

- навыками привлечения физических констант, справочных данных, оценки порядка величин и опоры на их размерности при решении задач волновой оптики.

8.1. Когерентные волны

Интересные и практически важные явления возникают, когда в одной точке сходятся две волны с одинаковыми частотами и направлениями колебаний вектора \mathbf{E} :

$$E_1 = E_{m1} \cos[\omega t + (\alpha_1 - kx_1)], \quad E_2 = E_{m2} \cos[\omega t + (\alpha_2 - kx_2)], \quad (8.1)$$

где α_1, α_2 — начальные фазы; x_1, x_2 — расстояния от источников волн до точки A . На векторной диаграмме (рис. 8.1) мгновенные проекции векторов \mathbf{E}_{m1} и \mathbf{E}_{m2} на ось E соответствуют формуле (8.1) с учетом соотношений $\varphi_1 = \alpha_1 - kx_1$, $\varphi_2 = \alpha_2 - kx_2$. Так как эти векторы вращаются с *одинаковой* угловой скоростью ω , то ее же имеет и результирующий вектор \mathbf{E}_m :

$$E = E_m \cos(\omega t + \varphi). \quad (8.2)$$

Как следует из рис. 8.1,

$$E_m^2 = E_{m1}^2 + E_{m2}^2 + 2E_{m1}E_{m2} \cos \delta, \quad (8.3)$$

$$\delta = k(x_1 - x_2) + \alpha_2 - \alpha_1. \quad (8.4)$$

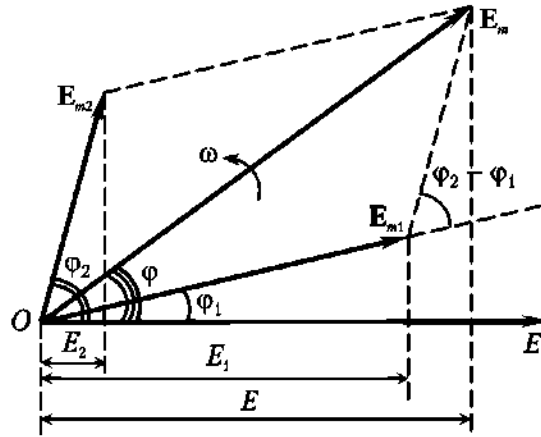


Рис. 8.1

В соответствии с формулами (8.3) и (7.77) *интенсивность* результирующей волны

$$J = J_1 + J_2 + 2\sqrt{J_1 J_2} \cos \delta. \quad (8.5)$$

Как видим, она зависит от разности фаз δ между волнами. Рассмотрим ее варианты.

1. δ изменяется во времени *хаотически*. Тогда его среднее во времени значение $\langle \cos \delta \rangle = 0$, и формула (8.5) превращается в тривиальное соотношение $J = J_1 + J_2$: повесив две лампочки, мы и ожидаем получить удвоенную интенсивность J (при $J_1 = J_2$).

2. $\delta = \text{const}$, $\cos \delta < 0$. Тогда $J < J_1 + J_2$! Более того, при $J_1 = J_2$ и $\delta = (2m + 1)\pi$, $m = 0, 1, 2, \dots$, получаем $J = 0$ — свет плюс свет дает темноту!

3. $\delta = \text{const}$, $\cos \delta > 0$. Тогда $J > J_1 + J_2$! При $J_1 = J_2$ и $\delta = 2m\pi$, $m = 0, 1, 2, \dots$, получаем $J = 4J_1$, что не менее удивительно: два источника могут увеличить интенсивность вчетверо!

Поскольку δ зависит не только от начальных фаз α_1 и α_2 , но и от расстояний x_1 и x_2 , то в одних точках возникнет условие 2 и *минимум интенсивности*, в других — условие 3 и ее *максимум*, а в третьих интенсивность будет иметь промежуточное значение.

Перераспределение интенсивности в результате наложения волн с образованием максимумов и минимумов называется **интерференцией**¹.

ВОПРОС. Почему же описанные явления не наблюдаются?

ОТВЕТ. Обычные источники света не соответствуют условиям 2, 3 ($\delta = \text{const}$), поскольку излучения атомов не согласованы друг с другом по фазе. Даже один и тот же атом в каждом акте излучения «забывает» о предыдущем акте и производит волну с иной начальной фазой: фазы меняются произвольно, непредсказуемо.

Волны и их источники, разность фаз между которыми постоянна, называются **когерентными**, а волны и источники, не удовлетворяющие этому условию, — **некогерентными**.

Понятие о когерентности волн ввел в XIX в. О. Ж. Френель. Акт излучения атома длится в интервале времени $\Delta t \approx 10^{-8}$ с, определяющем **времен-**

¹ Интерференцией называют и другие наложения. Например, мыши, зараженные смертельной болезнью, не умирают потому, что больны другой болезнью. Выработанные при этом антитела стали основой лекарства «Интерферон».

ную когерентность. За это время формируется *отрезок волны* $\Delta l = c\Delta t \approx 3$ м (c — скорость света) с упорядоченно изменяющейся фазой. Он называется **цугом** (рис. 8.2) и определяет **пространственную когерентность**.

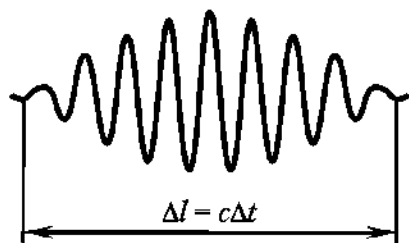


Рис. 8.2

Когерентные волны можно получить путем *разделения* одной и той же волны: при $x_{\max} \ll \Delta l$, где x_{\max} — больший из двух путей от места разделения, в конечную точку A приходят когерентные «близнецы».

8.2. Интерферометр Юнга

В установке английского физика Т. Юнга (1773—1829) часть волны, вырезанная щелью A диафрагмы D_1 , разделяется щелями A_1 и A_2 диафрагмы D_2 (рис. 8.3).

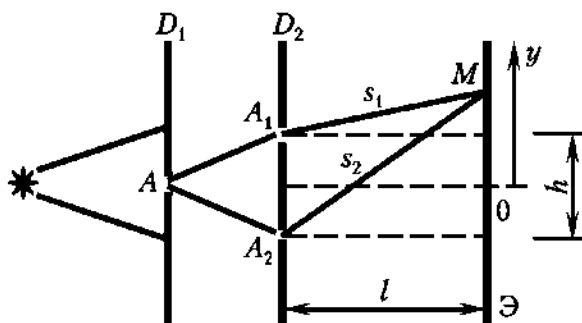


Рис. 8.3

Поскольку $AA_1 = AA_2$, фазы волны в точках A_1 и A_2 совпадают, и в точке M экрана

$$\delta = \frac{\omega}{c}(n_2 s_2 - n_1 s_1), \quad (8.6)$$

где использованы соотношения (7.69), (7.75) и (8.4), а n_i, s_i — показатель преломления и путь, пройденный волной в i -й среде. Произведение ns отражает возможность распространения волн в *разных средах* и называется **оптической длиной пути**, а

$$\Delta L = n_2 s_2 - n_1 s_1 \quad (8.7)$$

называют **оптической разностью хода**. Поскольку в вакууме (воздухе) $n_1 = n_2 = 1$, то $\Delta L = s_2 - s_1$, а зависимость $\Delta L(y)$ можно определить из выражения, которое следует из рис. 8.3:

$$s_2^2 - s_1^2 = \left[l^2 + \left(y + \frac{h}{2} \right)^2 \right] - \left[l^2 + \left(y - \frac{h}{2} \right)^2 \right] = 2hy.$$

При $h \ll l$ имеем $s_2 + s_1 \approx 2l$ и потому

$$\Delta L = s_2 - s_1 = \frac{2hy}{s_2 + s_1} \approx \frac{hy}{l}, \quad \delta = \frac{\omega hy}{c l} = \frac{2\pi hy}{cT l} = \frac{2\pi hy}{\lambda_0 l}, \quad (8.8)$$

где λ_0 — длина волны в вакууме (воздухе). Отсюда условия минимумов и максимумов интенсивности:

$$\frac{2\pi hy_{\min}}{l_0 l} = (2m + 1)\pi, \quad y_{\min} = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{l}{h} \lambda_0, \quad m = 0, 1, \dots; \quad (8.9)$$

$$\frac{2\pi hy_{\max}}{l_0 l} = 2m\pi, \quad y_{\max} = m \frac{l}{h} \lambda_0, \quad m = 0, 1, \dots. \quad (8.10)$$

Если диафрагму D_1 освещать, например, красным светом, то на экране возникнет *чередование красных и темных полос*, причём m — это номер очередного максимума (минимума). Расстояние между ними определяется соседними значениями m :

$$\Delta y = y_{\max, m+1} - y_{\max, m} = \frac{l}{h} \lambda_0. \quad (8.11)$$

Отсюда следует важный вывод: по величине Δy можно измерить длину световой волны!

ВОПРОС. Изменится ли картина при освещении диафрагмы дневным светом?

ОТВЕТ. Как ясно из формул (8.9), (8.10), для одной λ_0 максимумы возникают в одних местах экрана, для другой — в других и т.д. Следовательно, *смешанный* свет (дневной) разложится на составляющие, что позволит анализировать его состав!

Интересно и другое. Для *смещения* максимумов (минимумов) на экране достаточно изменения ΔL всего на $\lambda/2$. Учитывая, что $\lambda \sim 10^{-7}$ м, получаем сверхчувствительный индикатор, способный фиксировать изменение оптической разности хода на ничтожную величину! Это позволяет очень точно контролировать состояние поверхностей и измерять линейные и угловые размеры, что используют в оптических гироскопах и системах автоматического регулирования. Если же на пути одного из лучей поместить кювету с газом или жидкостью, то в соответствии с формулой (8.7) можно с высокой точностью измерить показатель преломления вещества, а значит, и его состав. Наконец, если бы на одном из путей луча изменилась скорость света, это также повлияло бы на разность фаз (8.6). Именно так А. Майкельсон и Э. Морли безуспешно пытались найти ее зависимость от системы отсчета (см. параграф 1.2).

8.3. Интерференция при отражении

Разделение волны на две когерентные можно реализовать и при ее отражении от стенки при условии $L \ll c\Delta t$ (рис. 8.4).

В соответствии с формулой (8.4) в каждой точке A фаза *отраженной* волны 2 отличается от фазы *падающей* волны 1 на $\delta = 2k(L - x_A) + \alpha$, где α — фазовый сдвиг, возникающий при отражении (он будет обсужден ниже).

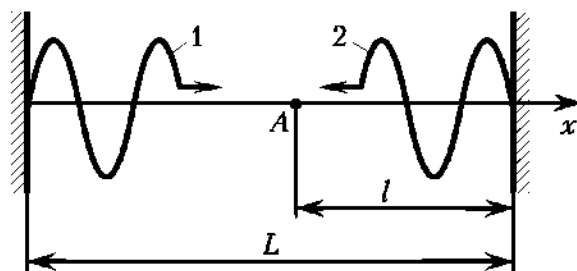


Рис. 8.4

Отсюда условия минимума или максимума интенсивности:

$$2k(L - x_{\min}) + \alpha = (2m + 1)\pi/2, m = 0, 1, 2, \dots; \quad (8.12)$$

$$2k(L - x_{\max}) + \alpha = 2m\pi/2, m = 0, 1, 2, \dots. \quad (8.13)$$

Если слева также находится отражающая стенка, то волна «бегает» между ними. Поскольку условия (8.12), (8.13) выполняются в *одних и тех же* точках, возникающая волна называется **стоячей**. Точки x_{\min} , в которых амплитуда колебаний *всегда* минимальна, называют **узлами**, а x_{\max} , в которых она *всегда* максимальна, — **пучностями** стоячей волны. Минимальное расстояние между узлами (либо пучностями) называется **длиной** стоячей волны:

$$\lambda_{\text{ст}} = x_{m+1} - x_m = \pi/k = \lambda/2, \quad (8.14)$$

где λ — длина бегущей волны (падающей или отраженной).

Концы *закрепленной* струны являются *узлами* стоячей волны по определению. Поэтому на ее длине L должно укладываться *целое число* $\lambda_{\text{ст}}$, т.е. $m\lambda/2$. Это условие определяет **собственные частоты** струны. Ее колебания могут *одновременно* содержать разные собственные частоты (стоячие волны изучают в лабораторном практикуме):

$$v_m = \frac{v}{\lambda_m} = \frac{v}{2L}m, m = 1, 2, \dots. \quad (8.15)$$

На рис. 8.5 показано три из множества вариантов.

Все то же относится к электромагнитным волнам в двухпроводных линиях с перемычками или в резонаторах, широко применяемых в технике сверхвысоких частот (СВЧ).

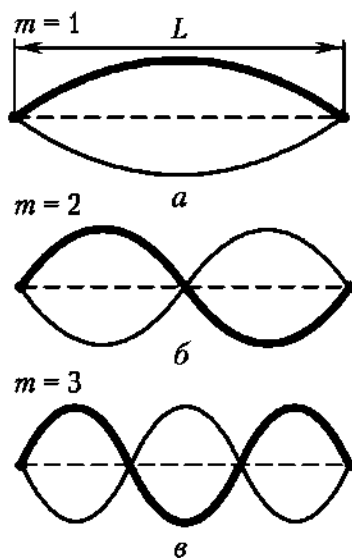


Рис. 8.5

Стоячие волны имеют не только практическое значение — они сыграли огромную роль в становлении современной физики (см. параграф 9.8).

Волна, упавшая на поверхность раздела среды 1 и среды 2 (рис. 8.6, а, б), не только отражается — поверхность раздела является вторичным излучателем в обе среды. Соответственно, возникает не только **отраженная**, но и **проходящая** волна (см. рис. 8.6, а).

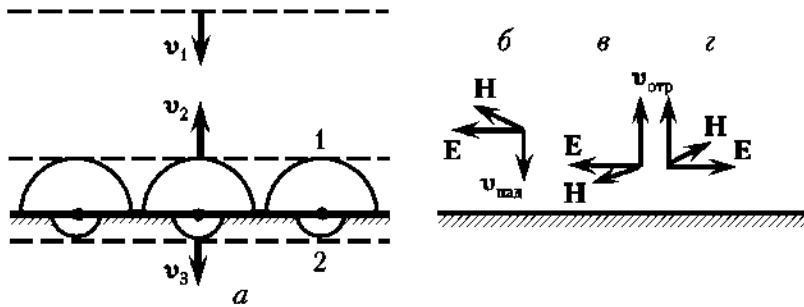


Рис. 8.6

Векторы фазовых скоростей v_2 и v_1 антипараллельны, но совпадают по модулю, так как $v = c/\sqrt{\epsilon}$, а вектор v_3 параллелен v_1 , но по модулю отличается, так как отличается ϵ .

Для сохранения правовинтовой тройки вектор E либо вектор H отраженной волны изменяет направление на π (варианты — на рис. 8.6, в, г). Это и есть тот скачок фазы при отражении, который учтен в формулах (8.12), (8.13). Поскольку точечный излучатель поверхности принадлежит одновременно двум средам, то выполняется условие непрерывности

$$E_{\text{пад}} \pm E_{\text{отр}} = E_{\text{прох}}; \quad H_{\text{пад}} \mp H_{\text{отр}} = H_{\text{прох}}, \quad (8.16)$$

где одновременно справедливы либо верхние, либо нижние знаки. Пользуясь, например, верхними, учитывая формулу (7.76) и равенство $\mu_1 = \mu_2$ (диэлектрики), получим эти уравнения в виде

$$E_{\text{пад}} + E_{\text{отр}} = E_{\text{прох}}; \quad \sqrt{\epsilon_1}(E_{\text{пад}} - E_{\text{отр}}) = \sqrt{\epsilon_2}E_{\text{прох}}, \quad (8.17)$$

где ϵ_1, ϵ_2 — диэлектрические проницаемости граничащих сред. Решая уравнения (8.17) совместно, получим $E_{\text{отр}} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} E_{\text{пад}}$, а поскольку интенсивность волны $J \sim E^2$, то из последнего выражения следует

$$J_{\text{отр}} = RJ_{\text{пад}}, \quad (8.18)$$

где $R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2$ называют **коэффициентом отражения**. Отношение $T = J_{\text{прох}}/J_{\text{пад}}$ называется **коэффициентом прозрачности**. Поскольку из закона сохранения энергии $J_{\text{пад}} = J_{\text{отр}} + J_{\text{прох}}$, то с учетом соотношения (8.18) $T = 1 - R$.

Наличие проходящей волны приводит к интерференции на масляных пленках, мыльных пузырях, оксидах металла и т.п. Поскольку часть 2 волны отражается от первой поверхности пленки, а часть 3 — от второй (рис. 8.7), то между ними возникает разность хода $2nd$, где n — показатель преломления материала пленки, а d — ее толщина.

Если $2nd$ равно **четному** числу полувольт, то на поверхности пленки возникают максимумы. Поскольку это условие зависит от λ , вариации толщины d пленки приводят при дневном свете к переливающимся цветным полосам.

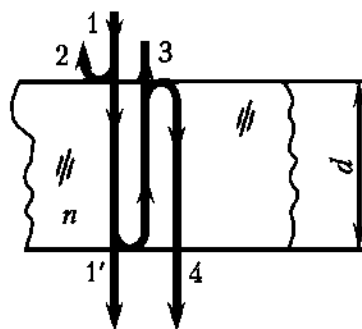


Рис. 8.7

Примеры практики

Интерференция лучей 2 и 3 (см. рис. 8.7) позволяет решать проблему потери света при отражении от оптики, ухудшающем качество изображения. В военной оптике отражение света формирует блики от биноклей, перископов и фотоаппаратов, что еще и демаскирует наблюдателя. Если на поверхность линзы нанести тонкую пленку толщиной d с показателем преломления n меньшим, чем у ее материала, то при условии $2nd = \lambda/2$ возникает интерференционный минимум, уменьшающий отражение. Поскольку это условие нельзя выполнить для всех λ одновременно, пленки рассчитывают на ту (зеленую) часть спектра ($\sim 0,5$ мкм), к которой глаз наиболее чувствителен. Такая оптика называется *просветленной*. Из-за недостатка в отраженном свете зеленых лучей она имеет сине-фиолетовую или голубоватую окраску (голубая оптика). Если непросветленная линза отражает 4–5% светового потока, то линза с однослойным покрытием — $\sim 1\%$, а с многослойным — $\sim 0,2\%$ света.

Интерференционный механизм заложен и в систему считывания информации с CD-диска. Диск содержит микроямки глубиной $\sim 10^{-7}$ м. Луч лазера, отраженный от поверхности диска, образует логическую единицу двоичной системы отсчета, а луч, отраженный от дна микроямки, имеет с ним разность фаз $\pi/2$. Возникший в связи с этим интерференционный минимум образует логический ноль.

Гораздо большую чувствительность — 10^{-19} м (!) — имеет интерферометр, использованный американскими физиками К. Торном, Р. Дрейвером и Р. Вайсом для обнаружения гравитационных волн в 2015 г. (см. подпараграф 1.4.3 и параграф 7.2).

Как следует из рис. 8.7, интерференция в пленке может наблюдаться и «на просвет» — между волнами 1 и 4. Продуктивна также интерференция в пленках *переменной* толщины. Если на плоскости лежит *плосковыпуклая линза*, то между их поверхностями формируется клиновидный воздушный зазор. Вследствие осевой симметрии линзы толщина зазора одинакова для точек, находящихся на равных расстояниях от оси системы. Поэтому при взгляде на поверхность сквозь линзу видны интерференционные максимумы и минимумы в виде концентрических колец **Ньютона** (их изучают в лабораторном практикуме). При малейшем локальном изменении толщины зазора меняется оптическая разность хода, и форма кольца искажается. Это позволяет с высокой точностью контролировать состояние плоской поверхности или сферичность линз.

8.4. Дифракция волн

Из-за преграды можно слышать звук, а глядя на солнце сквозь ресницы, видеть радужные пятна. Эти явления можно понять, пользуясь полезным приемом О. Ж. Френеля. **Метод зон Френеля** состоит в том, что любой

волновой фронт мысленно разбивают на участки (зоны), расстояния от которых до исследуемой точки M различаются на $\lambda/2$ (рис. 8.8), и используются три положения:

- 1) интенсивности излучений от зон равной площади равны;
- 2) интенсивность максимальна в направлении *нормали* к поверхности зоны, а в направлениях $\geq \pi/2$ к ней равна нулю (при промежуточных углах она имеет промежуточные значения);
- 3) интенсивность излучения *открытых* зон волновой поверхности не зависит от наличия зон, закрытых экранами.

Удалив перегородку A_1A_2 (см. рис. 8.3), получим большую щель (рис. 8.9, а).

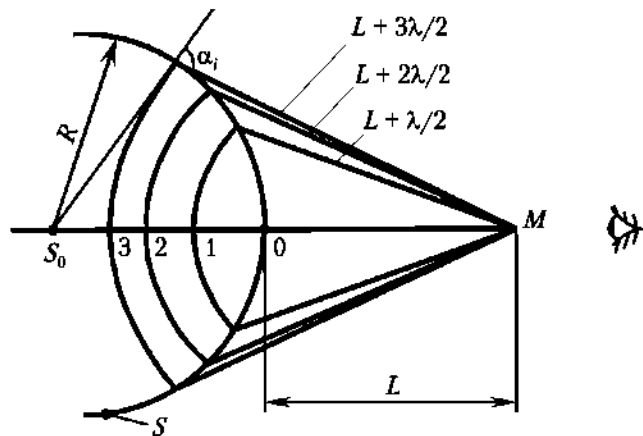


Рис. 8.8

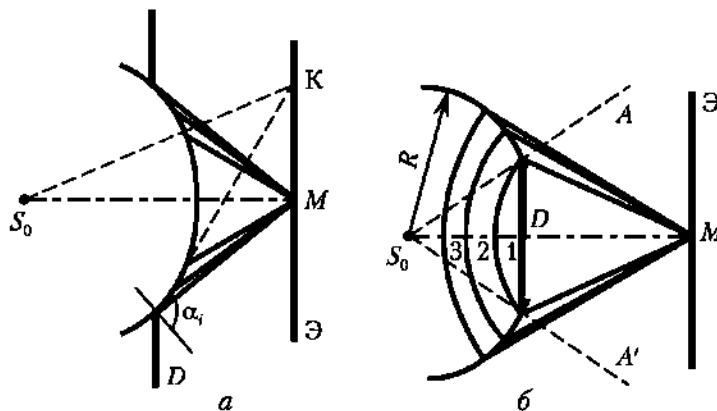


Рис. 8.9

Так как колебания от соседних зон приходят в точку M в *противофазе*, то

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - \dots, \quad (8.19)$$

где A_1, A_2, \dots — амплитуды колебаний в точке M , возбуждаемые первой, второй и последующими зонами волнового фронта. Из формул геометрии для шаровых сегментов следует, что площади всех зон Френеля примерно равны. В то же время угол α_i (см. рис. 8.9, а) между нормалью к поверхности зоны и направлением к точке M растет с увеличением номера i зоны, т.е. интенсивность излучения падает. Так как величина λ весьма мала (число зон, видимых из точки M , очень велико), то шаг аргумента α зависимости $A(\alpha)$ также мал. Поэтому можно полагать $A_i = (A_{i-1} + A_{i+1})/2$. Подставляя это выражение в формулу (8.19), получим

$$A = \frac{A_1}{2} + \left(\frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2} \right) + \left(\frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2} \right) + \dots \quad (8.20)$$

Так как выражения в скобках равны нулю, результат зависит только от числа открытых зон. Если оно *четное*, то $A = (A_1 + A_{m-1})/2 - A_m$, т.е. получаем *темное пятно*, а если *нечетное*, то $A = (A_1 + A_m)/2$ — *светлое пятно*. В частности, если в отверстии помещается только одна центральная зона, то $A = A_1$, что вдвое больше, чем от открытого источника!

По мере смещения по экрану от оси S_0M (см. точку K на рис. 8.9, *a*) число наблюдаемых зон будет то четным, то нечетным. Соответственно, возникают то темные, то светлые полосы.

ВОПРОС. Как изменится картина на экране, если центральные зоны волновой поверхности *закрываются* диафрагмой D (рис. 8.9, *b*)?

ОТВЕТ. В соответствии с третьим положением Френеля амплитуда колебаний в точке M экрана Э по-прежнему определяется выражением (8.20), где A_1 — амплитуда *первой открытой* зоны. Это означает: несмотря на наличие диафрагмы, в точке M по-прежнему должно наблюдаться светлое пятно, что явно *противоречит геометрической оптике!* Тем не менее это подтверждается экспериментом: свет как бы огибает диафрагму!

Явление огибания волнами препятствий в местах резкой неоднородности среды называется **дифракцией**.

Как видим, дифракция является результатом интерференции различных участков волнового фронта в области геометрической тени. Как и другие волновые явления, дифракция не зависит от природы волн — волны на поверхности воды и звуковые волны огибают преграды так же, как и свет.

Для анализа света удобнее использовать дифракцию *плоских* волн, называемую **дифракцией Фраунгофера** — по имени немецкого физика Й. Фраунгофера (1787—1826).

Пусть на диафрагму D со щелью шириной b и длиной $l \gg b$ падает плоская волна (рис. 8.10). Результат ее наблюдения под углом φ к нормали зависит от числа зон Френеля на части волнового фронта шириной b .

В данном случае анализ упрощается тем, что зоны имеют не только *одинаковую площадь*, но и ориентированы *под одним и тем же углом* к наблюдателю. Как следует из рис. 8.10, разность хода лучей определяется числом

открытых зон: $N = \frac{BC}{\lambda/2} = \frac{b \sin \varphi}{\lambda/2}$. При четном N в направлении φ наблюдается минимум интенсивности, а при нечетном — максимум:

$$b \sin \varphi_{\min} = \pm 2m\lambda/2, \quad b \sin \varphi_{\max} = \pm (2m + 1)\lambda/2, \quad m = 1, 2, \dots \quad (8.21)$$

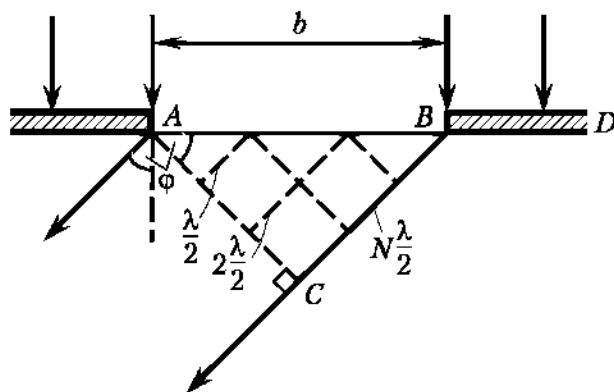


Рис. 8.10

Для разных λ максимумы и минимумы образуются под разными углами, а знаки « \pm » вызваны тем, что угол φ отсчитывают по обе стороны от нормали к диафрагме и экрану. Между диафрагмой и экраном размещают линзу, собирающую параллельные лучи. В результате на экране возникают полосы максимумов и разделяющие их полосы минимумов интенсивности.

Число m в формуле (8.21) называют **порядком дифракционного максимума** или **минимума**. С ростом m из-за роста φ интенсивность излучения зон и, соответственно, максимумов убывает. При $\varphi = 0$ разность хода между лучами отсутствует, и потому для всех λ возникает **максимум нулевого порядка**, однако положение ближайшего минимума уже зависит от λ . Поэтому если освещать щель *белым* светом, края центрального максимума имеют радужную окраску.

Свет, прошедший через щель в диафрагме, сосредоточен в основном в центральном максимуме.

ВОПРОС. Какова его угловая ширина?

ОТВЕТ. Как следует из формулы (8.21), она ограничена положением ближайших минимумов: $\sin \varphi_{\min} = \pm \lambda/b$. Этот угол по обе стороны нормали и определяет дифракционную расходимость пучка.

Щель может иметь разную форму. Например, на круглом отверстии диаметром d дифракционная картина на экране имеет такой же вид, но количественные соотношения несколько изменяются: $\sin \varphi_{\min} = \pm 1,22\lambda/b$. Это соотношение определяет, в частности, характеристики круглых линз и круглых *излучателей*. Действительно, если вместо отверстия использовать излучатель, имеющий ту же форму, то волновой фронт в плоскости излучателя не отличается от волнового фронта в отверстии. Соответственно и на пути к экрану волновая картина остается прежней. Поэтому основная энергия дискового излучателя, например гидролокатора, заключена в пределах дифракционной расходимости его луча.

Для четкости дифракционной картины необходимо, чтобы соседние максимумы не сливались. Как следует из формулы (8.21), при $b \rightarrow \lambda$ $\varphi_{\min} \rightarrow \pi/2$, т.е. весь экран засвечен центральным максимумом, а при $b \gg \lambda$ $\varphi_{\min} \rightarrow 0$, т.е. линии настолько узки, что сливаются, образуя обычное изображение щели в соответствии с законами геометрической оптики. Таким образом, дифракционная картина возникает только при $b \sim \lambda$. Это **основное условие дифракции**: *размеры неоднородности экрана или отверстия должны быть соизмеримы с длиной волны*. Например, при радиосвязи в городских условиях (в том числе при использовании радиовзрывателей) выбор частот сигнала диктуется не только отражением от зданий и сооружений, но и дифракцией.

При дифракции Фраунгофера на одной щели к экрану проходит мало света, и потому детали картины плохо различимы. Поэтому дифракцию лучше осуществлять на *многих* щелях, а свет от них суммировать (с помощью линзы). С этой целью Фраунгофер изобрел **дифракционную решетку** — систему одинаковых параллельных щелей, находящихся на равном расстоянии друг от друга. Ее изготавливают путем нанесения непрозрачных штрихов на прозрачную основу. Чем больше штрихов и чем ближе они друг к другу, тем лучше решетка как анализатор. В какой-то степени к ней при-

ближаются ресницы глаза и паутина. В современных решетках наносят тысячи штрихов на миллиметр.

Если a — ширина непрозрачного штриха, а b — ширина прозрачной щели, то $d = a + b$ называют **периодом решетки** (рис. 8.11). Из построения на рис. 8.11 ясно, что разность хода ΔL между параллельными лучами, исходящими от соседних щелей, составляет $d \sin \varphi$.

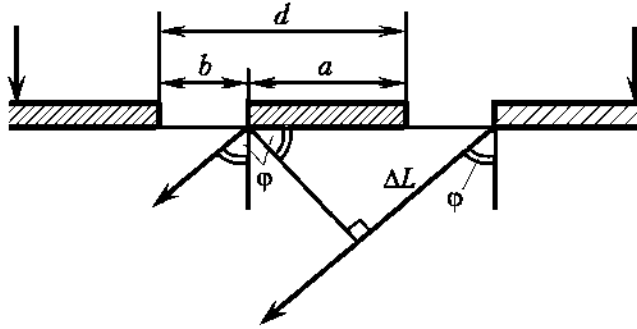


Рис. 8.11

Если она равна целому числу λ , то возникает максимум тем большей интенсивности, чем больше щелей. Таким образом, условие получения главного дифракционного максимума

$$d \sin \varphi = \pm n \lambda, \quad n = 0, 1, \dots, \quad (8.22)$$

где n — **порядок главного максимума**. Если φ не удовлетворяет условию (8.22), то совпадение фаз может «накопиться» через некоторое количество щелей и привести к появлению **побочного максимума**. Его интенсивность, естественно, меньше, чем главного, так как в его образовании участвует меньше щелей. Между побочными максимумами располагаются **побочные минимумы** (дифракционную решетку изучают в лабораторном практикуме).

Из формулы (8.22) следует, что для разных λ максимумы наблюдаются под разными углами, поэтому дифракционную решетку используют в качестве анализатора состава излучения — **дифракционного спектрографа**. Чтобы соседние линии λ и $\lambda + \Delta \lambda$ можно было различать, максимум линии должен быть не ближе к максимуму соседней, чем ее минимум (критерий Рэлея). Величину отношения $\lambda / \Delta \lambda$ называют **разрешающей способностью** спектрального прибора.

Дифракционную решетку можно также рассматривать как простейшую модель упорядоченной структуры вещества. Если регулярное чередование щелей сформировать по двум координатам, получим двумерную решетку, в которой условия (8.22) действуют по каждой из координат. Если же двумерные решетки (сетки) «сложить в стопу», то получим трехмерную, пространственную дифракционную решетку, где то же условие (8.22) прибавится еще по одной координате. Подобные среды существуют в виде монокристаллов твердого тела (см. параграф 4.9). Поскольку периоды их решеток $\sim 10^{-9} - 10^{-10}$ м, оптический диапазон для получения дифракции непригоден — соизмеримую длину волны имеют только рентгеновские лучи. Максимумы получаемой в таких случаях дифракционной картины имеют вид системы пятен, положение которых удовлетворяет одновременно трем условиям вида (8.22). Расшифровывая полученную картину, можно получить информацию о периодах решетки, т.е. о структуре вещества. Такой **рентгеноструктурный анализ** широко применяют в физике твердого тела.

8.5. Геометрическая оптика

Метод Френеля настолько хорош, что, как мы увидим ниже, может быть положен в основу самоликвидации для целого ряда оптических устройств! Посмотрим из точки M на точечный источник света S (см. рис. 8.8). В соответствии с формулой (8.20), если число видимых зон четное, то в последней скобке будет нехватать $A_{N-1}/2$, а если нечетное, то в конце будет лишний член $A_N/2$. Однако в обоих случаях последний член стремится к нулю, так как $\alpha \rightarrow \pi/2$. Поэтому $A = A_1/2$, т.е. из точки M реально видна лишь центральная зона, радиус которой очень мал. Например, для $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м (зеленый свет) при $R = L = 10$ см он составляет $\sim 0,16$ мм, т.е. точечный источник света и воспринимается как точечный — свет от него распространяется в виде тонкого луча. Тем самым метод Френеля дает основания для геометрической оптики, где необходимость в рассмотрении зон отпадает — в этом и состоит его самоликвидация.

В геометрической оптике используют представление об обратимости световых лучей, независимости их друг от друга, а траектория светового луча определена **принципом Ферма**, названным по имени французского физика П. Ферма (1601—1665). Он гласит: *время прохождения светового луча между двумя точками минимально*. Это означает, что луч выбирает минимальную длину пути, которая в однородных средах соответствует его *прямолинейному* распространению. Удобство замены волнового фронта одним лучом видно на примере падения волны с плоской волновой поверхностью AB и фазовой скоростью v_1 на плоскую границу раздела сред 1 и 2 (рис. 8.12).

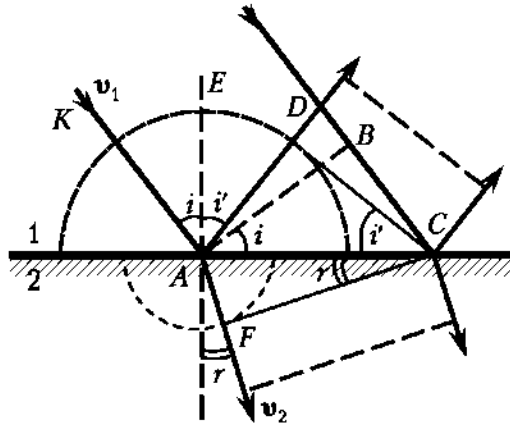


Рис. 8.12

В течение времени $\Delta t = BC/v_1$ точка B волновой поверхности еще движется к поверхности раздела, а точка A уже излучает вторичные волны в обе среды с радиусами фронтов

$$\begin{aligned} AD &= v_1 \Delta t = v_1 BC / v_1 = BC, \\ AF &= v_2 \Delta t = BC v_2 / v_1. \end{aligned} \tag{8.23}$$

Для других точек между A и C радиусы меньше, а в точке C равны нулю. Поэтому огибающие вторичных волн определяются в среде 1 плоскостью CD , а в среде 2 — плоскостью CF . Таким образом, лучи KA , AD и AF , будучи перпендикулярными к волновым поверхностям AB , CD и CF , совпадают с направлениями фазовых скоростей и полностью характеризуют эволюцию волн на поверхности раздела. Их называют соответственно **падающим**, **от-**

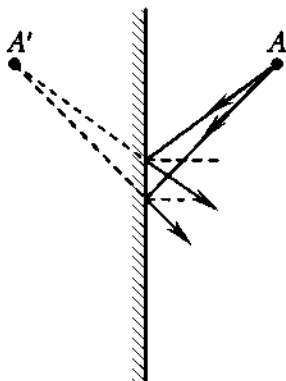


Рис. 8.13

раженным и преломленным лучами, а углы i , i' и r , образованные лучами и нормалью к поверхности раздела, — углами падения, отражения и преломления.

Закон отражения установил еще Гюйгенс. Из равенства треугольников ADC и ABC следует закон отражения $i' = i$, на котором основано действие зеркал, история которых восходит еще к Бронзовому веку. В XIII в. металл зеркал заменили стеклом, покрытым тонким слоем олова, а затем и серебра. Появление в плоском зеркале мнимого изображения A' точечного источника A понятно из рис. 8.13.

Примеры практики

Плоские, вогнутые и выпуклые зеркала широко используют в телеобъективах, системах видеонаблюдения, антеннах, коллиматорах. Чаще других применяют параболические зеркала, формирующие пучок параллельных лучей. Для скрытного наблюдения и в видоискателях используют также полупрозрачные зеркала. Применение зеркал в военном деле восходит еще к Архимеду, который, по не подтвержденным данным, в III в. до н.э. сжег вогнутыми зеркалами римский флот. Современные эксперименты подтвердили, что несколько десятков зеркал действительно могут выполнить подобную задачу. В наше время зеркала применяют для более серьезного оружия, например для фокусировки первичного излучения ядерного запала, инициирующего взрыв термоядерной бомбы (см. параграф 11.5).

Закон отражения дает возможность скрытного наблюдения объектов по ломаной линии. На рис. 8.14, а показаны поворотные призмы, применяемые в биноклях, перископах и стереотрубах (танки, подводные лодки и т.д.). Простейший перископ — это труба, на обоих концах которой закреплены поворотные призмы, а изображение увеличивают системой линз.

Угловой отражатель (рис. 8.14, б) имеет вид пирамиды, три грани которой — зеркала, а четвертая прозрачна и обращена к наблюдателю. В катафоте множество таких отражателей лежит в одной плоскости, причем они повернуты друг относительно друга под произвольными углами — откуда бы луч ни падал, он отражается в противоположном направлении, и катафот кажется светящимся. Угловыми отражателями снабжают бакены и буйки радиолокаторов (навигация), а прикрепленные к шарам-зондам, они позволяют определять скорость и направление ветра на большой высоте. Установленные на спутниках и косми-

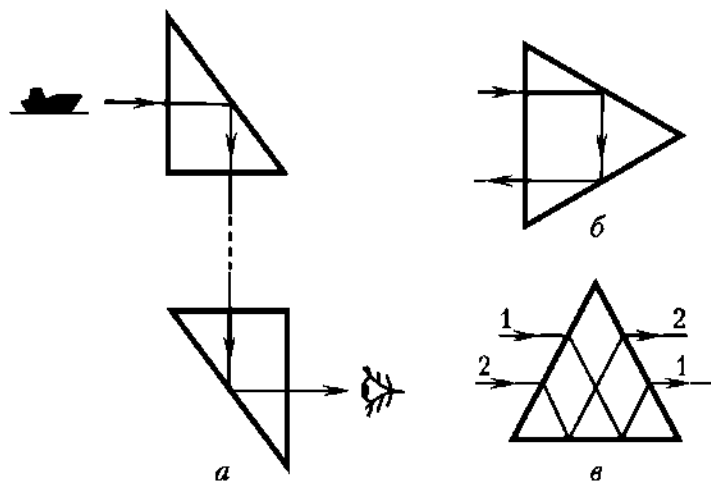


Рис. 8.14

ческих кораблях, такие отражатели позволяют с большой точностью определять расстояния до этих объектов. Масштабный пример — отражатели, установленные на Луне (в 1969 г. — американский, в 1970 г. — французский на советском аппарате «Луноход-1»). Они позволили измерить расстояние до нее (лучом лазера) с точностью ~40 см!

Угловые отражатели на макетах военной техники превращают их в ложные цели, предназначенные для отвлечения противника от истинных целей. Их используют также при испытаниях систем самонаведения собственных ракет.

Практически важен и **закон преломления** голландского астронома и математика В. Снеллиуса (1580—1626), который выводили также Гюйгенс и Декарт. Он описывает связь между углами падения i и преломления r (см. рис. 8.12). Ее можно получить из прямоугольных треугольников ABC и AFC : $\sin i = BC/AC$, $\sin r = AF/AC$, т.е.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{BC}{AF} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{12}, \quad (8.24)$$

где использованы формулы (8.23) и (7.73). Величина n_{12} называется **относительным показателем преломления**. Таким образом, отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно относительному показателю преломления. Как ясно из рис. 8.12, в тонких пленках, например, разность хода отраженного и дважды преломленного луча зависит от угла падения. Поэтому с изменением угла падения меняется и возникающая интерференционная картина.

В случае перехода луча из оптически более плотной среды в оптически менее плотную $r > i$, и потому при $\sin i \geq n_{12}$ возникает **полное внутреннее отражение**. Его можно наблюдать в подсвеченных фонтанах, где свет не выходит за пределы струй воды независимо от их изгибов, в демонстрационных экспериментах с лазером или погрузившись в море. Если смотреть вверх, избегая преломленных лучей солнца, то видна лишь внутренняя поверхность воды. Этот эффект лежит в основе замечательного изобретения.

Примеры практики

В XIX в. возникла потребность размещать источник света (электрическую дугу) вне взрывоопасного помещения, например порохового цеха. В начале XX в. американский физик Р. Вуд (1868—1955) предложил использовать для этого **световод**, основанный на полном внутреннем отражении. Если внутренний слой двухслойной стеклянной нити имеет показатель преломления больший, чем внешний, то свет из такой нити вырваться не сможет (рис. 8.15): при освещении ее торца он пройдет по нити независимо от ее изгибов. А если свет модулировать, то такую нить можно использовать и для передачи телеграфной информации. Оказалось, однако, что на основе дуги и даже появившихся затем ламп накаливания осуществить эту идею невозможно: в световод проходит ничтожная

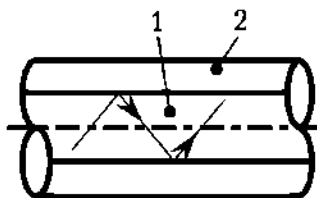


Рис. 8.15

часть светового потока, которая к тому же быстро затухает. Кроме того, модуляция света оказалась слишком инерционной.

Все кардинально изменилось с появлением экономичных и миниатюрных полупроводниковых лазеров. Они генерируют остронаправленный монохроматичный луч, который можно модулировать с частотой $\sim 10^8$ Гц. Параллельно появились технологии, позволившие на несколько порядков уменьшить потери энергии сигнала в световоде.

Волокно световода представляет собой стеклянную нить, в которой область с большим показателем преломления имеет диаметр 7–10 или 50–60 мкм. Она окружена оболочкой диаметром 125 мкм, обладающей меньшим показателем преломления (см. рис. 8.15). Нить оптического волокна окружена еще одной, защитной, оболочкой диаметром 250 мкм.

В 2009 г. за достижения в области передачи оптических сигналов по такому волокну китайский физик Ч. Као был удостоен Нобелевской премии. Число волокон в кабеле может быть разным — до $\sim 10^9$. При большом числе волокон их склеивают в жгут и полируют его торцы. Поскольку потоки световых сигналов с чуть отличающимися длинами волн в оптоволокне не смешиваются, можно одновременно передавать $\sim 10^7$ телефонных и $\sim 10^6$ видеосигналов. За доли секунды можно передать полный текст всех томов любой энциклопедии. Достоинства волоконно-оптических линий используют как локально (компьютеры, бортовые системы, медицинская диагностика, кардиохирургия), так и для коммуникации на больших расстояниях (кабельное телевидение, Интернет и т.д.). В 1988–1989 гг. была введена в эксплуатацию первая трансатлантическая волоконная линия, соединившая Англию и США.

Поскольку фотон не имеет заряда, световой сигнал нечувствителен к помехам (паразитные связи в каналах, молнии и электромагнитный фон от радиопередатчиков, электродвигателей и т.п.), которые вредно влияют на аппаратуру, приводят к сбоям, катастрофам и требуют дорогостоящей экранировки. Кроме того, собственное излучение электронных линий — это питательная среда радиопионажа, а волоконно-оптические линии обеспечивают скрытность информации. Их применяют для мгновенной передачи текстовых, фото- и видеофайлов, особенно там, где важна их защищенность (правительственная связь, управление войсками и т.п.). Легкие и компактные оптические линии используют даже для непосредственного управления подвижными средствами боя, например противотанковой управляемой ракетой (ПТУР), а беспилотный самолет-разведчик может передавать в штаб телевизионное изображение позиций противника по волокну, сматываемому с барабана.

На законах преломления основана и работа линз, дополняющих выдающееся изделие природы — глаз, который представляет собой собирающую линзу (см. параграф 12.2).

Искусственная линза состоит из оптически прозрачного однородного материала (стекло, пластмасса), ограниченного двумя полированными преломляющими поверхностями — сферическими и плоскими в разных сочетаниях. Из-за кривизны поверхностей линзы углы падения и преломления в разных ее точках различны, поэтому линза может быть как собирающей, так и рассеивающей. Уже в Древней Греции и Древнем Риме с помощью линз собирали солнечный свет, добывали огонь, а император Нерон пользовался линзой для коррекции зрения. Изображение, создаваемое линзой, и его характер определяют геометрическими построениями, пользуясь лучами, параллельными оптическим осям, а также проходящими через оптический центр или один из фокусов линзы (рис. 8.16).

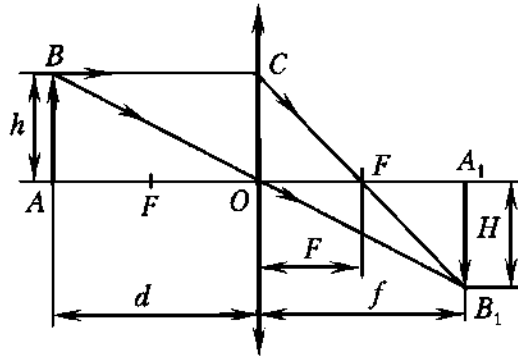


Рис. 8.16

В зависимости от положения предмета относительно ее фокусного расстояния линза формирует уменьшенное или увеличенное изображение, мнимое или действительное. Для тонких линз и центральных лучей справедлива формула, показывающая, что оптическая сила линзы D (измеряемая в диоптриях) — величина, обратная фокусному расстоянию:

$$\pm \frac{1}{F} = \pm \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f} = D = (n - 1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right), \quad (8.25)$$

где знак «+» фокусного расстояния F относится к собирающей линзе, а знак «-» — к рассеивающей; расстояния d и f имеют знак «+» для действительных предмета и изображения и знак «-» — для мнимых; r_1 и r_2 — радиусы кривизны поверхностей линзы. Линейное увеличение Γ линзы определяется отношением линейных размеров изображения H и предмета h :

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}. \quad (8.26)$$

При получении изображений возникают те или иные искажения (абберации), связанные с формой линз, зависимостью коэффициента преломления от частоты и т.д. Линзы имеют многочисленные применения.

Примеры практики

В радарх применяют диэлектрические линзы, собирающие поток радиоволн в приемную антенну либо фокусирующие его на цель. Их используют и в оптических взрывателях, установленных в головной части ракеты. Линза, фокусирующая свет на фотоэлемент, имеет конус обнаружения, при пересечении которого целью на выходе фотоэлемента возникает импульс тока, который активирует взрыватель. Во многих приборах применяют сочетание объектива, формирующего действительное изображение, и окуляра, который его увеличивает. С этой целью переднюю фокальную плоскость окуляра совмещают с задней фокальной плоскостью объектива и в ней же ставят стекла с измерительными шкалами. Угловое увеличение (кратность), которое дает такая система, равно отношению фокусных расстояний объектива и окуляра.

8.6. Поглощение и рассеяние волн

При прохождении света через вещество атомы вещества поглощают и преобразуют его энергию. Поэтому интенсивность J волны в направлении ее распространения убывает (рис. 8.17). Ее убыль пропорциональна числу встреченных волной атомов и, следовательно, ее пути l в веществе, а также

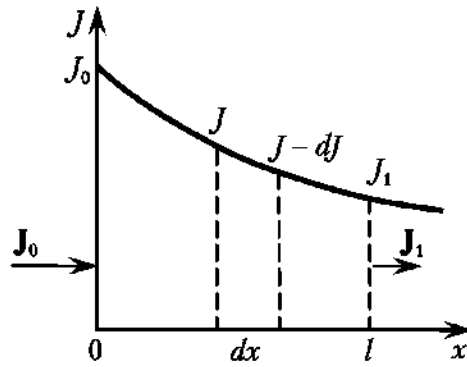


Рис. 8.17

самой интенсивности J , от которой зависит энергия вынужденных колебаний осцилляторов вещества. Таким образом, $dJ = -\mu J dl$, где коэффициент μ зависит от свойств вещества и называется **коэффициентом поглощения**.

Разделяя переменные и интегрируя от 0 до l и от J_0 до J , получаем

$$J = J_0 e^{-\mu l}. \quad (8.27)$$

Это выражение называют **законом Бугера**. Убывание интенсивности волны можно иногда наблюдать и визуалью — луч прожектора как бы обрывается в воздухе.

ВОПРОС. Каков физический смысл коэффициента μ ?

ОТВЕТ. Он следует из формулы (8.27): это величина, обратная такой толщине слоя вещества, при которой J уменьшается в e раз. На практике часто пользуются **слоем половинного ослабления** — его толщиной $L_{1/2}$, проходя через которую интенсивность излучения уменьшается вдвое. В соответствии с формулой (8.27)

$$\frac{J_0}{2} = J_0 e^{-\mu L_{1/2}}, \quad L_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}. \quad (8.28)$$

Процессы, вызывающие поглощение энергии волны, связаны с возбуждением колебаний диполей вещества. Они приводят к их собственному излучению, направление которого необязательно совпадает с вектором фазовой скорости волны. В результате происходит ее **рассеяние**. Характер такого переизлучения зависит от относительного положения молекул вещества. Если оно структурно упорядочено с периодом d , то при $\lambda/2 > d$ ни под какими углами к первоначальному направлению волны дифракция не возникает (см. параграф 8.4). Следовательно, это неравенство является условием **оптической однородности** среды, при котором волна не изменяет направления своего распространения: вторичные волны, возбуждаемые в атомах, в этом направлении друг друга не гасят. То же относится и к однородной среде, не содержащей фиксированных в пространстве молекул, например газовой. В ней можно мысленно вычленивать ячейки (с большим числом молекул в каждой), размер которых мал по сравнению с λ , и полагать их вышерассмотренной структурой.

Большинство сред, однако, содержит **неоднородности**. К **мутным средам** относят **аэрозоли** — взвеси в газах мелких частиц (дым) или капелек жидкости (туман), **эмульсии** — взвеси капелек одной жидкости в другой (например, молоко в воде), **матовые стекла**, **коллоидные растворы** и т.п. В мутных

средах частицы расположены хаотично. Если их размеры малы ($\leq 0,1\lambda$), то разные частицы возбуждаются в разных фазах волны, и их вторичное излучение некогерентно. Оно не может интерферировать и взаимно гаситься, поэтому свет *рассеивается* по всем направлениям. Теорию такого рассеяния разработал английский физик Д. Рэлей (1842—1919), получивший Нобелевскую премию (1904 г.) за открытие аргона.

Вынужденные колебания зарядов атома, образующих диполь, происходят с частотой ω электрического поля волны: $x = a \cos \omega t$. Амплитуда волны, излучаемой диполем, пропорциональна ускорению заряда d^2x/dt^2 , т.е. ω^2 , а интенсивность J пропорциональна квадрату амплитуды. Следовательно, интенсивность рассеянного света

$$J \sim \omega^4. \quad (8.29)$$

Видимое нами небо — это солнечный свет, рассеянный атмосферой. Если бы она исчезла (а мы остались живы), то небо и днем было бы черным и звездным. **Закон Рэля** (8.29) объясняет и цвет неба: сильнее рассеивается коротковолновая (голубая) часть спектра, которая и видна при наблюдении сбоку по отношению к солнечному лучу — она приходит к нам от всех точек небосвода. В первичном направлении волны ее недостает, поэтому свет в этом направлении выглядит более красным, что мы и наблюдаем, глядя на Солнце утром и вечером, когда его свет проходит через большую толщу атмосферы, чем днем.

Советский физик Л. И. Мандельштам (1879—1944) и польский физик М. Смолуховский (1872—1917) показали, что рассеяние характерно и для беспримесных сред, где неоднородности имеют вид *флуктуаций плотности*, которые возникают, например, вследствие хаотического движения молекул. Так как с ростом температуры флуктуации растут, летом небо имеет более насыщенный голубой цвет, чем зимой.

Если N частиц объединены в составную, размер которой мал по сравнению с λ , то амплитуда ее вторичного излучения возрастает в N раз, а интенсивность — в N^2 раз. Если же размеры составной частицы $\geq \lambda$, то входящие в ее состав частички колеблются с разными фазами и интенсивность рассеяния уменьшается. Поскольку этот эффект тем сильнее, чем меньше λ , в рассеянном свете начинают преобладать более длинные волны. Поэтому конденсированная в капли влага облаков дает белый цвет рассеяния — в отличие от голубого цвета несконденсированных водяных паров. То же относится и к другим относительно крупным неоднородностям.

Рассеяние света используют во всевозможных устройствах освещения и сигнализации. Например, в светомаскировочных насадках на военном транспорте используют отражатели в виде отдельных прямоугольников. В зависимости от расстояния они вследствие рассеяния света видны отдельно или слитно, что позволяет оценить дистанцию в колонне.

8.7. Дисперсия волн

Колебания зарядов вещества под действием поля \mathbf{E} волны зависят от ее частоты. Отсюда следует зависимость диэлектрической проницаемости, показателя преломления вещества и фазовой скорости волны от частоты света. Она называется *дисперсией*. Если с ростом частоты показатель пре-

ломления растёт, дисперсия называется **нормальной**. Типичное ее проявление — разложение дневного света в спектр с помощью призмы, которое наблюдал еще И. Ньютон. Задолго до Ньютона человек наблюдал ее в виде игры цвета в каплях росы или в виде радуги, происхождение которой правильно объяснили в Иране и Германии еще в XIII в.: это результат преломления и отражения света на поверхностях капли. В настоящее время призмные спектрографы, наряду с дифракционными, служат для **спектрального анализа** — точнейшего метода определения состава вещества. С его помощью был, например, открыт гелий при наблюдении солнечной короны (1868 г.). Впоследствии он был обнаружен и на Земле и получил широкое применение.

Вынужденные колебания атомов вещества могут привести и к резонансу — на определенных частотах наблюдается **резонансное поглощение**. В этой области показатель преломления с ростом частоты уменьшается, и дисперсия называется **аномальной**. Если излучение имеет *сплошной спектр*, то его интенсивность особенно сильно убывает именно на резонансных частотах, характерных для данного вида атомов (молекул). Обычное стекло, например, пропускает оптическую, но поглощает ультрафиолетовую часть спектра, которую пропускает *кварцевое* стекло. Если стекло на просвет выглядит красным, значит, оно сильнее поглощает зеленую и синюю части спектра, и т.д.

ВОПРОС. Влияет ли дисперсия на качество передачи информации?

ОТВЕТ. Составляющие аналогового сигнала образуют волновой пакет — пространственную совокупность гармоник, мгновенная форма которой определяется ее составляющими. Для того чтобы приемник воспроизвел сигнал, его форма должна сохраняться, однако в результате дисперсии гармонические составляющие по пути к приемнику образуют *временной сдвиг* по отношению друг к другу. Такое искажение, расплывание формы сигнала особенно существенно, если между источником и приемником находятся преграды, поскольку коэффициенты отражения, прозрачности, поглощения и рассеяния материалов по-разному зависят от частоты.

В этом отношении гораздо надежнее кодировать информацию импульсами. Они также представляют собой сумму гармоник и потому при передаче расплываются, однако здесь это не имеет уже значения — достаточно, чтобы приемник был в состоянии обнаруживать импульсы, а соответствующие характеристики колебаний можно воспроизвести «на месте» *с любой нужной точностью*. Так возникла *цифровая форма кодирования информации*. В техническом отношении она является развитием телеграфной модуляции (см. параграф 7.10), но содержательно представляет собой иное. Здесь с помощью импульсов передается двоичный код *любого параметра* сигнала, например его амплитуды в данный момент времени.

8.8. Поляризация волн

В продольной волне единственно возможное направление колебаний задано вектором ее фазовой скорости, а в поперечной их может быть бесчисленное множество. Если направление колебаний изменяется во времени по определенному закону, то волну называют **поляризованной**, а если *хаотично*, то **неполяризованной**. Поляризацию света установил еще Х. Гюйгенс в XVII в.

В отдельном акте излучения атома возникает волна, в которой колебания вектора \mathbf{E} лежат в одной плоскости. Такую волну называют **линейно-** или **плоскополяризованной**. Поскольку естественный свет вызван хаотичным излучением множества атомов, он неполяризован, однако может быть превращен в поляризованный. В луче 2 рассеянного света, ортогональном первичному лучу 1 (рис. 8.18, *а*), есть лишь одно возможное направление колебаний, которое перпендикулярно обоим лучам. Следовательно, в направлении луча 2 свет **линейно поляризован**. Это используют, например, пчелы (воспринимающие поляризованный свет) для ориентации в пространстве.

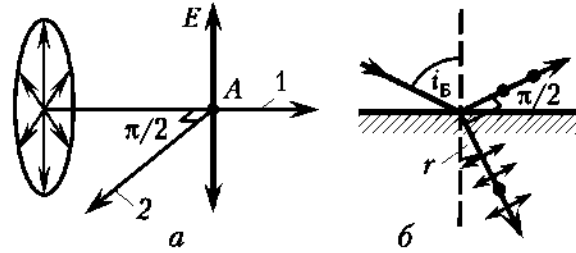


Рис. 8.18

Шотландский физик Д. Брюстер (1781—1868) обнаружил, что такое же явление возникает при падении света на поверхность раздела сред под углом, который затем был назван в его честь **углом Брюстера** i_B . Это угол, при котором отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны.

При $i + r = \pi/2$ из закона преломления следует, что

$$\operatorname{tg} i_B = n_{12}. \quad (8.30)$$

В преломленном луче могут быть любые направления колебаний, в том числе направление, совпадающее с отраженным лучом, но в отраженном луче его уже быть не может (рис. 8.18, *б*). Подобно рассеянному лучу 2 на рис. 8.18, *а*, единственное направление колебаний в отраженном луче, удовлетворяющее направлениям отраженного и преломленного лучей, ориентировано перпендикулярно плоскости падения (плоскости рисунка). Поэтому отраженный луч **линейно поляризован** в этом направлении (на рисунке оно показано точками, в которые проецируются двусторонние стрелки). Так как энергия таких колебаний уходит в отраженный луч, то в преломленном луче их дефицит, поэтому он оказывается **частично поляризованным** в перпендикулярном к нему направлении (отмечено большим количеством стрелок по сравнению с точками). Если угол падения отличен от i_B , то отраженный луч поляризован лишь частично, а если падающий луч поляризован в плоскости падения, то отраженный луч вообще отсутствует (поляризацию при отражении изучают в лабораторном практикуме).

Поляризацию может осуществлять и среда, через которую проходит волна. Иллюстрацией служит шнур, пропущенный через щель. Если до щели направление его поперечных колебаний может изменяться хаотично, то после щели остается единственное направление колебаний, параллельное ей (рис. 8.19).

Следовательно, щель выполняет роль **поляризатора**. Свет поляризуют **осесимметричными кристаллами** (кварц, киноварь, турмалин и т.д.). В них фиксированы не только расстояния между молекулами, но и взаимная ориентация их осей, которые определяют **оптическую ось кристалла**. В на-

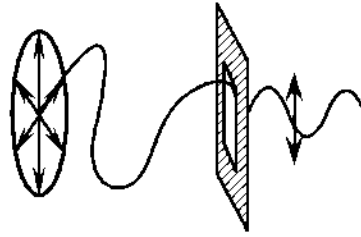


Рис. 8.19

правлении этой оси существует одна сила связи между зарядами, а в перпендикулярном направлении — другая. Соответственно, если вектор \mathbf{E} волны параллелен оптической оси кристалла, то переизлучение диполей определяет значения v_{\parallel} , ϵ_{\parallel} , n_{\parallel} , а в перпендикулярном направлении — v_{\perp} , ϵ_{\perp} , n_{\perp} . В последнем случае все плоскости, содержащие оптическую ось кристалла, в отношении взаимодействия с ним вектора \mathbf{E} волны равноправны. Если волна распространяется вдоль оптической оси кристалла, то вектор \mathbf{E} перпендикулярен ей независимо от поляризации луча. Если же направление луча иное, то вектор \mathbf{E} можно представить как сумму взаимно перпендикулярных компонентов \mathbf{E}_{\parallel} и \mathbf{E}_{\perp} , и падающий луч раздваивается в среде на два луча. Для компонента \mathbf{E}_{\perp} показатель преломления n_{\perp} не зависит от угла падения, выполняется закон преломления (8.24), и такой луч называют **обыкновенным** (o). Для компонента \mathbf{E}_{\parallel} показатель преломления n_{\parallel} уже зависит от угла падения (направления \mathbf{E}_{\parallel}). Такой луч называют **необыкновенным** (e). Описанное явление, которое впервые обнаружил Гюйгенс, называют **двойным лучепреломлением**.

Коэффициенты поглощения для лучей o и e также различны, и это явление называется **дихроизмом**. Например, в сульфате иодистого хинина обыкновенный луч полностью поглощается уже при толщине пленки $\sim 0,1$ мм. Проходя через подобные материалы, свет получает определенную поляризацию, и потому их называют **поляроидами**. Поляририд осуществляет с электромагнитной волной то же, что щель со шнуром. Направление колебаний, которое возникает после поляроида, называется **осью поляризатора**.

Если направление колебаний падающего на поляририд линейно поляризованного света составляет с этой осью угол α , то через поляририд пройдет только тот компонент света, вектор \mathbf{E} которого параллелен оси поляризатора. Его амплитуда $E = E_0 \cos \alpha$, а интенсивность

$$J = J_0 \cos^2 \alpha \quad (8.31)$$

(строго говоря, правую часть следовало бы еще умножить и на коэффициент прозрачности).

Этот закон установил французский физик Э. Л. Малюс (1775—1812).

ВОПРОС. Какова интенсивность прошедшего через поляририд *естественного света* с исходной интенсивностью J_0 ?

ОТВЕТ. Применяя формулу (8.31) к каждому направлению колебаний, получим

$$J = \sum_{i=1}^N J'_i \cos^2 \alpha_i = N J'_0 \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos^2 \alpha_i \right) = J_0 \overline{\cos^2 \alpha} = \frac{1}{2} J_0, \quad (8.32)$$

где J'_0 — средняя интенсивность колебаний одного направления; N — число направлений колебаний в естественном свете (которое практически бесконечно велико).

Закон Малюса свидетельствует, что поляроид можно применять не только для поляризации, но и для анализа света.

Примеры практики

Еще викинги использовали природный поляроид-минерал, чтобы в целях навигации найти направление на скрытое облаками солнце. С помощью поляроида нетрудно убедиться в поляризованности света, отраженного от воды, стекла и других диэлектриков. Часто он имеет вид бликов, которые мешают рассмотреть предметы, находящиеся в воде и на дне водоема, например при разведке брода, поиске препятствий и минировании. Если повернуть анализатор так, чтобы выполнялось $\alpha = \pi/2$, то поляризованный свет проходить через него не будет. Это и делают поляроидные очки, фильтры и т.п.

В отличие от человеческого глаза, глаза пчел и муравьев реагируют на поляризацию света и воспринимают более богатый видимый мир.

На практике широко применяют *скрещенные поляроиды*, оси которых взаимно перпендикулярны: первый служит поляризатором, а второй — анализатором. Их используют, например, в *дефектоскопии* прозрачных деталей. В местах дефектов и неоднородностей пластмасс молекулы ориентированы в преимущественном направлении. В результате через анализатор видно темное поле для изотропных (однородных) и светлое — для анизотропных (неоднородных) участков. Такой *пьезооптический эффект* возникает и вследствие механических нагрузок, что применяют при моделировании из пластмасс и стекла деталей машин и строительных конструкций для оценки возникающих напряжений.

Скрещенные поляроиды можно применять и для *управления* интенсивностью поляризованного света путем поворота второго поляроида, однако *механический* поворот весьма инерционен. Поскольку оптическая анизотропия вызвана поляризацией, ее можно получать гораздо быстрее — с помощью электрического поля. Интенсивность поляризованного света, который прошел между обкладками конденсатора, помещенного в кювету с нитробензолом, зависит от напряжения на его пластинах. Этот **эффект Керра**, названный в честь шотландского физика, практически безынерционен — коммутация луча в жидких диэлектриках происходит за 10^{-9} – 10^{-10} с. Его применяют как средство модуляции света, например лазерного луча. Ячейку Керра используют при скоростной фотосъемке (световой затвор), световой записи звука на киноленте и т.д. Аналогичный эффект (Коттона — Мутона) возникает и под действием магнитного поля.

В последние десятилетия активно используют оптические свойства **жидких кристаллов**. Они находятся в состоянии, промежуточном между изотропным жидким и анизотропным кристаллическим (твердым). Сохраняя текучесть, они в то же время обладают анизотропией диэлектрической проницаемости, что характерно для твердых тел. Это приводит к двойному лучепреломлению и дихроизму. Например, нематические жидкие кристаллы (от греч. *нema* — нить) состоят из нитевидных молекул, взаимодействие которых выстраивает их в определенном порядке. Под действием внешнего электрического поля оптические оси кристаллов переориентируются, что позволяет управлять прохождением света. Их используют, например, для окон, способных таким образом изменять прозрачность в зависимости от освещенности. Однако наиболее широко их применяют для отображения информации на дисплеях (компьютеры, телевизоры, калькуляторы, часы и т.д.). Их преимуществом являются низкие рабочие напряжения (~1 В) и малая потребляемая мощность (~1 мкВт), что позволяет управлять жидкими кристаллами непосредственно от микросхем.

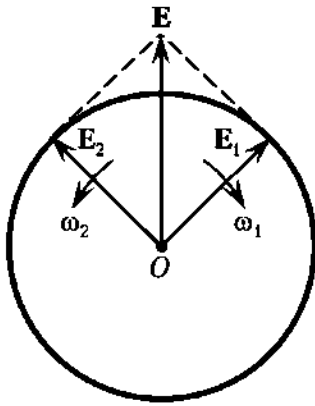


Рис. 8.20

Линейно поляризованную волну можно представить суперпозицией не только E_{\parallel} и E_{\perp} , но и двух волн с **круговой поляризацией**, если эти векторы имеют равные амплитуды и угловые скорости (рис. 8.20).

Если на пути такой волны возникает вещество с *разными* скоростями вращения по часовой стрелке и против нее, то произойдет *поворот плоскости поляризации*, который обнаружил еще М. Фарадей. Среды, обладающие подобным свойством, называются **оптически активными**. Оно обусловлено тем, что молекулы не всегда обладают *зеркальной симметрией*.

Если они имеют форму, например, правовинтовой спирали, то при отражении в зеркале будут иметь вид левовинтовой спирали, и потому по отношению к «правому» и «левому» вращению ведут себя по-разному.

Такой оптической активностью обладают водный раствор сахара, кварц, скипидар, а также спиралевидные молекулы органического вещества: белки, нуклеиновые кислоты и т.д. (асимметрия органического вещества была обнаружена французским физиком П. Кюри). Чем больше таких молекул встречается на пути поляризованного света, тем больше угол поворота плоскости поляризации. На этом основаны приборы, измеряющие, например, концентрацию растворов сахара или глюкозы в пищевой и фармацевтической промышленности.

Резюме

Подводя итоги настоящей главы, отметим ее основные положения.

Волны взаимодействуют с веществом. Если они когерентны, то при определенных условиях результатом их сложения могут быть интерференция и дифракция. Инструментами их анализа служат принцип Гюйгенса, зоны Френеля и принцип Ферма для геометрической оптики.

Интерференция и дифракция лежат в основе спектрографов, позволяющих анализировать состав излучения, геометрические размеры и показатель преломления вещества, качество оптических изделий и характеристики излучателей.

Поглощение, рассеяние, дисперсия и поляризация волн определяются средой и влияют на процессы приема-передачи информации. Они лежат в основе различных диагностических устройств.

Волновая оптика играет большую роль в природе, науке и технике, в том числе относящейся к ВВТ.

Вопросы для самоконтроля

1. Почему дифракция звука в повседневном опыте наблюдается гораздо чаще, чем дифракция света?
2. Как изменяется основной тон струны при увеличении ее длины? Может ли струна издавать не «чистый» тон? Какова роль грифа и корпуса гитары?
3. Почему неупругие материалы хорошо поглощают звук?
4. Как изменяются коэффициенты отражения и прозрачности, если свет проходит не из воздуха в стекло, а наоборот?

5. Перед диафрагмой D помещена слюдяная пластинка, перекрывающая щели 1 и 2 (см. рис. 8.3). В результате интерференционная картина на экране Э сместилась вниз по сравнению с картиной без пластинки. Чем это объяснить?
6. Почему на коротковолновом диапазоне радиоприемника слышно гораздо больше станций, чем на длинноволновом?
7. Глаз дает на сетчатке перевернутое изображение, почему же мы видим предметы не перевернутыми?
8. Почему на закате солнце кажется более красным, чем на восходе?
9. Как должны быть ориентированы друг относительно друга оптические оси поляризованных стекол фар и лобового стекла каждого автомобиля, чтобы дорога перед ним была хорошо видна, а ослепление встречными фарами уменьшилось?
10. Почему цветное стекло имеет на просвет разный цвет в зависимости от его толщины?

Задачи с решениями

8.1. Для проверки разброса толщины стеклянной пластинки ($n = 1,5$) ее перемещают по плоскости диафрагмы D так, что щели 1 и 2 остаются перекрытыми (см. рис. 8.3). В результате интерференционная картина на экране Э при длине волны света $0,59$ мкм смещается относительно точки A в пределах трех интерференционных полос. В каких пределах изменяется толщина пластинки?

Дано: $\lambda = 0,59$ мкм = $5,9 \cdot 10^{-7}$ м; $n = 1,5$; $m = 3$.

Δd — ?

Решение. В соответствии с формулами (8.7), (8.10) условие интерференционного максимума $\Delta L = n_2 s_2 - n_1 s_1 = m\lambda$, $m = 0, 1, 2, \dots$. В отсутствие пластинки максимум нулевого порядка в точке A возникает при $\Delta L = s_2 - s_1 = 0$. При наличии пластинки условие максимума в точке A

$$\Delta L = nd_2 + s_2 - n_1 d_1 - s_1 = nd_2 - nd_1 = m\lambda,$$

где d_2, d_1 — толщина пластинки у щелей 2 и 1 соответственно; m — порядок интерференционного максимума, который в данном случае равен числу полос, на которое сдвинулась картина. Отсюда

$$\Delta d = \frac{m\lambda}{n}.$$

Подставляя данные, получим $\Delta d = 1,18$ мкм.

8.2. На какой основной частоте будет под ветром резонировать вытяжная труба высотой 5 м? Атмосферное давление принять равным $9,8 \cdot 10^4$ Па, воздух считать двухатомным газом плотностью $1,34$ кг/м³.

Дано: $h = 5$ м; $p = 9,8 \cdot 10^4$ Па; $\rho = 1,34$ кг/м³.

ν — ?

Решение. Для основного тона стоячей волны

$$h = \frac{\lambda}{2} = \frac{v}{2\nu}, \quad \nu = \frac{v}{2h} = \frac{1}{2h} \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}.$$

Для двухатомного газа $i = 5$, $\gamma = 1 + 2/i = 1,4$. Из уравнения Клапейрона — Менделеева имеем

$$\frac{RT}{M} = \frac{p}{\rho}.$$

Таким образом,

$$v = \frac{1}{2h} \sqrt{\frac{1,4p}{\rho}}$$

Подставляя данные, получим $v = 32$ Гц.

8.3. Интенсивность звука от взрыва составляет 10^6 Вт/м² (что соответствует параметрам некоторых свето-шумовых гранат). Какой толщины деревянная стена может защитить человека от поражения, если считать кратковременно допустимым уровень звука 120 дБ? Звуковую волну считать плоской. Коэффициент поглощения звука древесиной принять равным 5 м⁻¹.

Дано: $J_0 = 10^6$ Вт/м²; $L = 120$ дБ; $\mu = 5$ м⁻¹.

d — ?

Решение. Искомая толщина стены определяется законом Бугера (8.27): $J = J_0 e^{-\mu d}$. Интенсивность J следует из допустимого уровня громкости (7.85):

$$L = 10 \lg \frac{J}{J_{\text{пор}}}, \quad J = J_{\text{пор}} 10^{0,1L},$$

где $J_{\text{пор}} = 10^{12}$ Вт/м² — порог слышимости. Таким образом,

$$J_{\text{пор}} 10^{0,1L} = J_0 e^{-\mu d}, \quad d = \frac{1}{\mu} \left(\ln \frac{J}{J_{\text{пор}}} - 0,1 \ln 10 \right).$$

Подставляя данные, получим $d = 2,76$ м (что нереально).

8.4. Для уменьшения отражения света от объектива, выполненного из оптического стекла, на его поверхность нанесена пленка из фтористого магния толщиной $9,9 \cdot 10^{-2}$ мкм ($n = 1,39$). Какую длину волны оптического диапазона гасит такое покрытие при угле падения света, равном нулю?

Дано: $n = 1,39$; $d = 9,9 \cdot 10^{-8}$ м.

λ — ?

Решение. По условию интерференционного минимума

$$2nd = (2m + 1)\lambda/2,$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$. Максимальная длина волны, удовлетворяющая этому условию, соответствует $m = 0$. Отсюда $\lambda = 4nd$.

Подставляя данные, получим $\lambda = 0,55$ мкм.

8.5. При падении естественного света на поляроид толщиной $0,05$ мм его интенсивность на выходе составляет 40% от исходной. Каков линейный коэффициент поглощения материала поляроида?

Дано: $d = 0,05$ мм = $5 \cdot 10^{-5}$ м; $J/J_0 = 0,4$.

μ — ?

Решение. В соответствии с формулой (8.32) естественный свет при прохождении поляроида теряет половину своей интенсивности, остальные потери связаны с поглощением, определяемым законом Бугера (8.27). Следовательно,

$$0,4J_0 = 0,5J_0 e^{-\mu d},$$

откуда

$$\mu = \frac{1}{d} \ln \frac{0,5}{0,4}.$$

Подставляя данные, получим $\mu = 4,46$ м⁻¹.

Задачи для самостоятельного решения

8.6. Бензин на поверхности воды образует тонкую пленку, которая при отражении солнечного света под углом 35° к поверхности окрашена в оранжевый ($\lambda = 0,62$ мкм) цвет. Какова минимальная толщина пленки?

8.7. На дифракционную решетку, содержащую 100 штрихов на 1 мм, нормально падает монохроматический свет. Зрительная труба спектрометра наведена на максимум третьего порядка. Чтобы наблюдать другой максимум того же порядка, нужно повернуть трубу на угол 20° . Определите длину волны света.

8.8. Предельный угол полного внутреннего отражения света на границе с воздухом для некоторого кристалла равен 24° . Под каким углом падения света из воздуха на поверхность этого кристалла отраженный луч будет полностью поляризован?

8.9. Контролируя параллельность поверхностей стеклянной пластины, на нее направили свет с длиной волны 0,6 мкм перпендикулярно одной из поверхностей. В результате при отражении света наблюдают интерференционные максимумы на расстоянии 1,5 мм друг от друга. Каков угол между плоскостями пластины?

8.10. Угол между осями поляризатора и анализатора составляет 60° . На какой угол нужно повернуть анализатор, чтобы интенсивность прошедшего через него света возросла вдвое?

Раздел IV

**КВАНТОВАЯ
ФИЗИКА**



Глава 9

КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

*Логика — поступь сороконожки.
Озарение — прыжок оленя через
пропасть.*

В результате изучения данной главы учащийся должен:

знать

- противоречия классической и основания квантовой физики, ее предмет, цели, основные понятия, модели, положения и законы;
- физическую сущность квантовых теорий теплового излучения, фотоэффекта, эффекта Комптона, водородоподобного и многоэлектронных атомов;
- интерпретацию волновой функции, соотношение неопределенностей и границы применимости классической теории;

уметь

- распознавать, вычленять и анализировать проявления квантовых закономерностей в изучаемых объектах природы и техники;
- формулировать изучаемую военно-техническую задачу с позиций законов квантовой физики и применять ее аппарат для решения задачи;

владеть

- навыками применения законов квантовой физики при решении военно-технических задач, сформулированных как физические;
 - навыками привлечения физических констант, справочных данных, оценки порядка величин и опоры на их размерности при решении задач квантовой физики.
-

9.1. Тепловое излучение

Происхождение света может быть разным. Излучение, возникающее под действием *внешних* факторов, называют **люминесценцией**. Ими могут быть *биохимические реакции* (свечение насекомых, морских обитателей, гниющего дерева); электромагнитное излучение (свечение люминофора лампы дневного света); *удары частиц* (свечение экрана электронно-лучевой трубки) и т.д. Общий признак разных видов люминесценции — после снятия возбуждающего фактора свечение прекращается. К длительным ее видам относится **радиolumинесценция**. Из веществ, содержащих тысячные доли процента радиоактивных примесей, изготавливают **люминофоры постоянного действия**, которыми покрывают ночные знаки и стрелки различных приборов.

Помимо люминесценции, существует излучение, органично присущее веществу. Оно определяется тепловым движением атомов и называется **тепловым излучением** (излучение Солнца, тела человека и т.д.). Грубой иллюстрацией его закономерностей может служить нагреваемая током спираль: энергия ее излучения растет, а цвет меняется — из темной она стано-

вится вишневой, красной, а затем и белой. Спектр такого излучения является *сплошным*.

Мощность излучения с единицы площади поверхности тела в единичном интервале частот называется его **излучательной способностью** (r). Она зависит от температуры тела и частоты излучения:

$$r(\nu, T) = \frac{dP_{\text{изл}}}{d\nu}.$$

Излучение телом энергии должно вызывать понижение его температуры. При этом она не может стать ниже температуры окружающей среды, так как это противоречило бы второму закону термодинамики: энергия не может самопроизвольно передаваться от тела с меньшей температурой к телу с большей температурой (см. параграф 4.8). Этому не происходит потому, что наряду с *излучением* энергии тела *поглощают* ее, и такой обмен энергией приводит в изолированной системе к установлению *теплового равновесия* (см. параграф 4.2).

Поглощательная способность тела (коэффициент поглощения) также зависит от его температуры и частоты излучения:

$$k(\nu, T) = \frac{dP_{\text{погл}}}{dP_{\text{пад}}},$$

где $dP_{\text{пад}}$ — мощность излучения, падающего на единицу площади поверхности в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$; $dP_{\text{погл}}$ — часть этой мощности, поглощенная телом.

Обмен энергией путем излучения-поглощения определяется соотношением между r и k . Его можно установить, рассматривая теплоизолированную вакуумную полость с телами 1 и 2 и фильтром 3 (рис. 9.1, а), прозрачным только для исследуемой полосы частот $\nu \div \nu + d\nu$. Мощность dP_a излучения по стрелке a определяется собственным излучением тела 1 и отраженным от него излучением тела 2 в данном интервале частот. То же относится к телу 2:

$$dP_a = r_1 d\nu + r_2(1 - k_1)d\nu, \quad dP_b = r_2 d\nu + r_1(1 - k_2)d\nu.$$

При тепловом равновесии потери энергии тела 1 по стрелке a компенсируются ее поступлением по стрелке b , т.е. $dP_a = dP_b$. Отсюда следует **закон Кирхгофа**, установленный немецким физиком Г. Р. Кирхгофом в 1895 г.:

$$\frac{r_1(\nu, T)}{k_1(\nu, T)} = \frac{r_2(\nu, T)}{k_2(\nu, T)} = \frac{r(\nu, T)}{k(\nu, T)} = f(\nu, T), \quad (9.1)$$

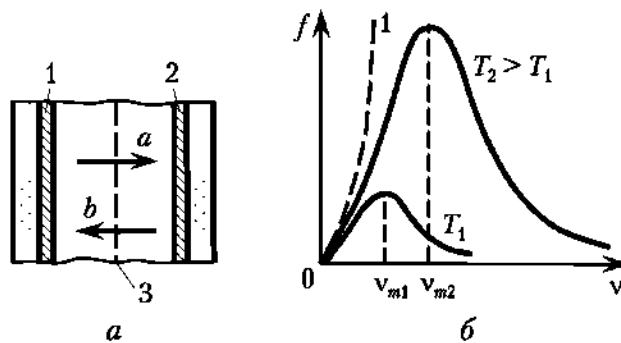


Рис. 9.1

т.е. отношение излучательной способности к поглощательной не зависит от природы тела, а является универсальной функцией частоты и температуры.

С функцией Кирхгофа $f(\nu, T)$ связаны поистине революционные события в истории науки. Проще всего ее определять для абсолютно черного тела, которое полностью поглощает излучение ($k = 1$) и, следовательно, $f(\nu, T) = r(\nu, T)$. В этом случае функция Кирхгофа описывает распределение мощности излучения черного тела по частотам. Приближением к нему являются сажа, черный бархат или малое отверстие в стенке полости. Попавшее в него излучение, многократно отражаясь от внутренней поверхности полости, имеет малую вероятность выйти в отверстие наружу и в конце концов поглощается материалом стенок (этим объясняется и темнота открытых окон в солнечный день).

Вид функции Кирхгофа (рис. 9.1, б) определен с помощью спектрометра. Интеграл от нее есть суммарная мощность излучения единицы площади поверхности на всех частотах и называется энергетической светимостью R_s . Л. Больцман и австрийский физик Й. Стефан (1835–1893) получили для нее закон Стефана – Больцмана:

$$R_s = \int_0^{\infty} f(\nu, T) d\nu = \sigma T^4. \quad (9.2)$$

Энергетическая светимость пропорциональна четвертой степени температуры.

Установленный экспериментально коэффициент пропорциональности $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ называется постоянной Стефана – Больцмана. Например, суммарная мощность падающего на Землю солнечного излучения вне атмосферы (солнечная постоянная) $\sim 1,4 \text{ кВт}/\text{м}^2$ (ее вариации определяются временем года и состоянием Солнца).

Тела, которые в отношении излучения и поглощения отличаются от черного, называют серыми. Для них правая часть (9.2) содержит дополнительный коэффициент серости $k < 1$.

Как следует из экспериментов, с ростом температуры частота ν_m , на которую приходится максимум функции Кирхгофа, смещается в сторону более высоких частот (см. рис. 9.1, б). Это отражает смещение всего спектра излучения (вспомним накаляемую спираль). Используя законы термодинамики, немецкий физик В. Вин (1864–1928, Нобелевская премия 1911 г.) получил зависимость $\nu_m(T)$ теоретически:

$$\nu_m = aT, \quad (9.3)$$

где $a = 5,9 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ — постоянная Вина: частота, на которую приходится максимум энергии излучения, пропорциональна абсолютной температуре.

Этот закон смещения Вина применяют также в виде $\lambda_m = b/T$, где $b = 2,9 \cdot 10^3 \text{ м} \cdot \text{К}$. Например, в спектре излучения Солнца $\lambda_m \sim 0,5 \text{ мкм}$ (звездная область), откуда получаем для его поверхности $T \approx 6 \cdot 10^3 \text{ К}$. Более холодные звезды излучают в инфракрасном диапазоне, а более горячие — даже в рентгеновском. Тепловое излучение, возникшее при рождении Вселенной (Большой взрыв), в результате адиабатного расширения остыло до $2,7 \text{ К}$ (см. параграф 12.1) и находится в сантиметровом диапазоне длин волн.

На законах (9.2), (9.3) основана работа множества нагревательных и осветительных приборов, а также пирометров (от греч. *pyr* — огонь) — приборов для *дистанционного измерения* температуры. Они необходимы, когда объект недоступен из-за отдаленности, опасности или имеет столь высокие температуры, что контактные термометры с задачей не справятся (эпицентр ядерного взрыва, раскаленный металл в доменной печи).

В яркостных пирометрах исследуемое излучение сравнивают с излучением нити накаливания в узкой области спектра — необязательно в районе максимума спектральной плотности излучения (это делают и в лабораторном практикуме). Радиационные пирометры определяют температуру по энергетической светимости R_s . Они отличаются большей чувствительностью, поскольку используют *всю* энергию излучения, но менее точны, так как усредняют искажения реального излучения по сравнению с излучением черного тела. Датчиком пирометра служит тепловой приемник излучения, изобретенный еще в XIX в. Он содержит элемент, нагреваемый энергией излучения во всем спектральном диапазоне, в наше время это — полупроводниковый терморезистор или термопара. Изменение их температуры преобразуется в электрический сигнал.

Если дистанционные измерения температуры нужны при различных исследованиях и технологических операциях, то в оперативно-тактической военной деятельности часто важны наблюдения температурных контрастов. Они позволяют выявить и распознать источник тепла, например раненого под завалом или боевую машину, неизбежно формирующую температурный контраст с окружающей средой (см. параграф 4.6). Это позволяет решать задачи военной разведки, наведения высокоточного оружия и т.д.

Примеры практики

Мощность ИК-излучения автомобилей и танков — порядка сотен ватт, а самолетов — порядка нескольких киловатт. По этому признаку их выделяют тепловые пеленгаторы и «умные» снаряды, имеющие тепловые головки наведения на цель. Это выдающееся достижение военного искусства, которое исключает человеческий фактор в сложных системах дистанционного управления. Человек не в состоянии быстро и точно обрабатывать большие массивы разнообразной информации, нужной, например, для наведения на цель высокоточного оружия. Кроме того, его зрительный аппарат не способен работать в тех средах и обстоятельствах, которые не были предусмотрены эволюцией: ночные или сложные метеоусловия; быстрый полет в воздухе; положение под водой или в космосе; естественные или искусственные помехи. Не предъявляла эволюция и таких требований к глазу в отношении дальности, избирательности и точности информации, какие предъявляют современные ВВТ. Наконец, человек ненадежен: он подвержен болезням, эмоциям и усталости.

Тепловые системы наведения реагируют уже не только на мощные сигналы, исходящие, например, от сопла реактивного двигателя, но и на тело человека. Они способны фиксировать даже тепловой след самолета в воздухе или подводной лодки, спроецированный на поверхность океана, хотя перепад температуры в этих случаях может составлять лишь сотые доли кельвина! Тепловыми головками наведения снабжают переносные зенитно-ракетные комплексы (ПЗРК), ракеты класса «воздух — воздух» и т.д. Эти головки сопоставляют положение источника теплового излучения с траекторией движения ракеты и вводят в систему управления полетом корректирующий сигнал.

По этим причинам тепловая маскировка объектов крайне затруднена. Свет спички различим с расстояния 500 м, свет, проникающий через окна, — с высоты 10 км, а сопоставление вида объектов в разных частях спектра позволяет выявить скрываемые между ними различия. Например, маскировочные покрытия «под зелень» в ИК-диапазоне не маскируют, а наоборот, демаскируют объект. Испаряя влагу и образуя хлорофилл, натуральная листва и трава *охлаждается*, а искусственные, наоборот, *нагреваются*, причем с обеих сторон — как от солнца, так и от скрываемого объекта. Для маскировки в ИК-диапазоне нужны специальные материалы, поглощающие, теплоизолирующие или рассеивающие тепловое излучение. Например, черная матовая краска поверхности снижает яркость лазерного маркерного пятна в три-четыре раза, поропласт снижает тепловое излучение в десятки раз, а пленка воды толщиной 1 мм почти полностью его поглощает. Поэтому наряду с дымовыми завесами применяют водно-капельные.

Современные дымовые завесы отличаются от дымовых завес времен Великой Отечественной войны. Например, дымовая граната, содержащая смесь красного и белого фосфора, способна создать облако дыма диаметром в десятки метров, маскирующее танк в диапазоне длин волн 0,4—14 мкм. При последовательном выбросе подобных гранат в дымовой завесе формируются области высоких температур, которые служат отвлекающими тепловыми помехами для ИК-аппаратуры противника. Тем же пользуются и в авиации. Когда бортовые датчики ИК или лазерного излучения обнаруживают атаку, самолет автоматически сбрасывает ИК-ловушки. Они основаны на жидкостях, которые самовоспламеняются при распылении в воздухе (пирофорные материалы), создавая тем самым помехи ИК-головкам самонаведения ракет. С другой стороны, конструируя эти головки, стремятся обмануть противоракетные системы путем использования *нескольких* рабочих спектральных диапазонов одновременно (ПЗРК «Верба»). В таком случае блокировка противником одного из них не мешает работе в другом.

Введение противника в заблуждение — это один из приоритетов вооруженной борьбы. Например, в Первую мировую войну французы осуществили (не до конца) грандиозный проект имитации ночного Парижа — в 15 км от истинного Парижа, с целью отвлечь противника от реальных целей и побудить расходовать боезапас. С той же целью во время Второй мировой войны гитлеровцы построили в одной из скандинавских стран огромный аэродром с деревянными макетами самолетов. Англичане, пользуясь данными своей разведки, отреагировали с юмором: сбросили на этот аэродром одну-единственную, причем деревянную, бомбу.

В настоящее время не только имитируют военную технику каркасными или надувными макетами, но и учитывают наличие у противника тепловых систем разведки и наведения, которые не воспринимают неизлучающий объект в качестве цели. Это побуждает размещать в соответствующих местах макетов источники тепла, работающие за счет беспламенного окисления бензина либо на основе электронагревателей. Что же касается *реальной* военной техники, то здесь не идут по пути *привлечения* тепловых систем противника к источникам тепла, а, наоборот, *уводят* от них.

Существует и *активный* тепловой камуфляж в пределах границ техники. Ее прикрывают специальными термоэлектрическими пластинами, которые позволяют осуществить как тепловую маскировку, так и тепловую имитацию. Теплоизлучатели машины, например танка, производят температурный мониторинг окружающей среды. В соответствии с ее тепловым портретом камуфляжные пластины автоматически нагреваются, и в результате танк или вертолет в ИК-области практически сливаются со средой. Раньше к этому стремились только в оптическом диапазоне, применяя пассивные камуфляжные покрытия.

Уменьшение размеров и соответствующее повышение плотности размещения термоэлектрических пластин позволяют осуществить мимикрию, нацеленную

уже не на слияние со средой, а, наоборот, на предъявление противнику ложного, имитационного, объекта. Используя пластины в качестве своеобразных пикселей экрана, тепловой портрет танка подменяют имитацией, например портретом автомобиля или, что еще интереснее, собственного танка противника! Подобная технология может быть применена и к неподвижным объектам, например к командным или наблюдательным пунктам.

9.2. Квантовая природа света

Законами теплового излучения пользовались, как и некогда термометром (см. параграф 4.2): что такое температура, никто не понимал. Почему функция Кирхгофа имеет именно такой вид, а не иной?

Наиболее значимую попытку получить ее на кончике пера предприняли английские физики Д. Рэлей (1842—1919) и Д. Джинс (1877—1946). Однако их безупречные рассуждения привели к совпадению с экспериментальной кривой только в самом ее начале. Более того, полученная ими кривая 1 (см. рис. 9.1, б) оказалась *квадратичной* функцией ν .

ВОПРОС. Реальна ли квадратичная функция ν ?

ОТВЕТ. Нет: интеграл от такой функции, т.е. излучаемая телом мощность, стремится к бесконечности.

Проблема выглядела столь удручающей, что в ее название включили несвойственный науке эмоциональный компонент: **ультрафиолетовая катастрофа**. Все попытки разрешить противоречие оказались безуспешными, пока немецкий физик Макс Планк (1858—1947) не решился на очень смелый шаг. Он допустил, что энергия теплового (электромагнитного) излучения изменяется *дискретно*:

$$E = nE_0, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad E_0 = h\nu, \quad (9.4)$$

где h — постоянная Планка. Отдельные порции E_0 энергии Эйнштейн назвал потом **квантами**. Полученная М. Планком зависимость полностью совпала с эмпирическими функциями! Опираясь на это и пользуясь законами Стефана — Больцмана и Вина, можно было теперь вычислить $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, а если вместо ν пользоваться круговой частотой $\omega = 2\pi\nu$, то удобнее постоянная $\hbar = h/(2\pi)$, которую называют «аш с чертой».

Исторический экскурс

В студенческие годы университетский профессор не советовал студенту Планку посвящать свою жизнь физике: наука малоперспективная — за исключением некоторых мелких деталей, почти все в ней известно. Как говорил У. Томсон, на ясном небосводе физики есть только два облачка — опыты А. Майкельсона и излучение абсолютно черного тела. Профессор ошибся и в физике, и в своем студенте. День 14.12.1900, когда М. Планк изложил свою работу (Нобелевская премия 1918 г.), стал днем рождения *новой, современной, квантовой физики*. Она определила новый стиль мышления, приведший человека к ядерной энергии, лазерам, микроэлектронике, компьютерам и т.д.

Как обычно бывает, революцию вначале не осознали — формулы Планка соглашались рассматривать лишь в качестве математического призрака, за которым нет физической реальности (точно так же в свое время отнеслись к преобразованиям Лоренца, идеям Максвелла и Эйнштейна). Действительно, на фоне всего много-

векового опыта дискретное изменение энергии осцилляторов выглядело несурезно. В механике, электромагнетизме и термодинамике энергия всегда изменялась *непрерывно*. Первым, кто отнесся к идее Планка всерьез, был А. Эйнштейн: если она позволила разрешить противоречия теории теплового излучения, то не поможет ли она разобраться с теориями теплосмкости твердого тела и внешнего фотоэффекта, в которых также были проблемы?

9.3. Внешний фотоэффект

Внешний фотоэффект — это процесс вырывания электронов из вещества под действием света.

Обнаружил его немецкий физик Г. Герц, а исследовали русский физик А. Г. Столетов (1839—1896) и немецкий физик Ф. Ленард (1862—1947) (упоминаний о нем избегают, так как он был нацистом, однако из истории науки слова не выкинешь).

Простейшая схема их экспериментов показана на рис. 9.2, а. Ультрафиолетовое излучение через пропускающее его кварцевое окно падает на катод К вакуумного фотодиода и вырывает из него электроны. Они подхватываются электрическим полем между анодом А и катодом К и становятся носителями тока. С ростом напряжения в формировании фототока принимает участие все больше фотоэлектронов, поэтому он растет (рис. 9.2, б).

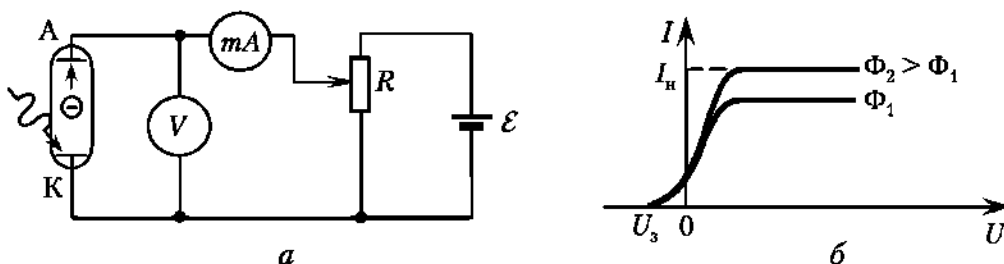


Рис. 9.2

ВОПРОС. Почему начиная с некоторого напряжения рост фототока на вольт-амперной характеристике прекращается?

ОТВЕТ. Ресурс фотоэлектронов оказывается исчерпанным: сколько их вылетает за одну секунду из катода, столько же приходит к аноду. Таким образом, наступает **насыщение**.

ВОПРОС. А почему при $U = 0$ $I \neq 0$?

ОТВЕТ. Потому что некоторые фотоэлектроны имеют достаточную энергию, чтобы достичь анода и без ускоряющего напряжения. Чтобы ток прекратился, нужно приложить обратное напряжение. Поскольку энергии у фотоэлектронов *разные*, по мере увеличения обратного напряжения все меньшая их часть способна преодолеть *тормозящее* поле. Наконец, при *задерживающем потенциале* U_s , определяемом формулой $mv_{\max}^2/2 = eU_s$, где e — заряд электрона, уже ни один из них не способен достичь анода.

Измеряя вольтамперные характеристики при разных условиях, А. Столетов и Ф. Ленард определили основные законы фотоэффекта:

1) максимальная скорость фотоэлектронов пропорциональна частоте света и не зависит от светового потока;

2) для каждого вещества существует *наименьшая* частота ν_0 света, при которой еще возможен фотоэффект. Она названа **красной границей фото-**

эффекта («красной»), так как определяет эту границу с низкочастотной, красной стороны);

3) фототок насыщения I_n пропорционален световому потоку.

Имеют ли эти законы теоретическое основание? В соответствии с электронной теорией вектор \mathbf{E} электромагнитной волны побуждает электроны к колебаниям, энергия которых может оказаться достаточной для выхода из металла. Амплитуда (7.43) вынужденных колебаний электрона, определяющая его скорость, пропорциональна амплитуде eE_m действующей на него силы. В то же время E_m — это амплитуда вектора \mathbf{E} волны, которая определяет ее интенсивность, т.е. световой поток. Таким образом, скорость фотоэлектронов должна расти с увеличением светового потока, а это противоречит первому закону фотоэффекта. Из той же формулы (7.43) и рис. 7.6 ясно, что зависимость скорости фотоэлектронов от частоты также противоречит этому закону.

Для разрешения противоречий А. Эйнштейн в 1905 г. воспользовался идеей квантов — если Планк применил ее к *излучению* электромагнитных волн, то Эйнштейн — к их *поглощению*. Более того, он предположил, что и в промежутке между излучением и поглощением само *электромагнитное поле* — это совокупность квантов энергии, которые можно отождествить с *частицами, имеющими энергию $h\nu$* . Они получили затем название **фотонов** (мысль, что свет состоит из частиц, была ранее высказана еще И. Ньютоном, а потом и Ж. Л. Гей-Люссаком, хотя база для таких предположений тогда отсутствовала).

Теория Эйнштейна состоит в следующем. Известно, что для выхода из вещества частице нужно затратить определенную энергию (см. параграф 4.9). Это относится и к электрону: для выхода из металла ему нужно совершить работу, не меньшую некоторой минимальной $A_{\text{вых}}$, которая названа **работой выхода**. Чтобы представить себе ее природу, вообразим кузнечиков в яме (рис. 9.3).

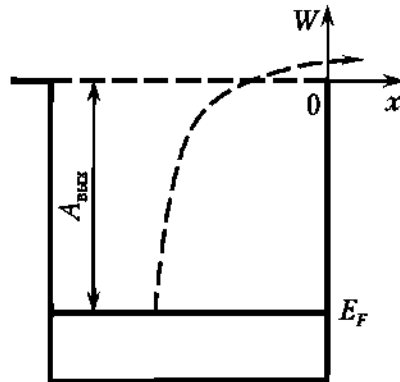


Рис. 9.3

Подпрыгивая, они достигают разной высоты, самые прыгучие — энергии E_F . Если на этом уровне их в достаточной мере подтолкнуть, то они покинут яму: разность между уровнем E_F и срезом ямы и определяет работу выхода. У каждого материала своя глубина «ямы» и свое распределение электронов-«кузнечиков» по энергиям. Фотон передает электрону энергию $h\nu$. Если $h\nu > A_{\text{вых}}$, то электрон не только покидает металл, но и имеет дополнительную кинетическую энергию, верхний предел которой $mv_{\text{max}}^2/2$. Остальные электроны в той или иной степени растрачивают часть этой энергии на

столкновения по пути к выходу из материала. Таким образом, **уравнение Эйнштейна для фотоэффекта** представляет собой вариант закона сохранения энергии:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}. \quad (9.5)$$

Оно просто и красиво обосновало экспериментально установленные факты. Световой поток — это совокупность фотонов, падающих на катод в единицу времени. От их числа зависит число фотоэлектронов и ток насыщения $I_{\text{н}}$. Максимальная энергия электронов определяется энергией $h\nu$ отдельного фотона, т.е. линейно зависит от частоты света (рис. 9.4). Для фотоэффекта нужно, чтобы как минимум $h\nu_0 = A_{\text{вых}}$, откуда красная граница фотоэффекта

$$\nu_0 = \frac{A_{\text{вых}}}{h}. \quad (9.6)$$

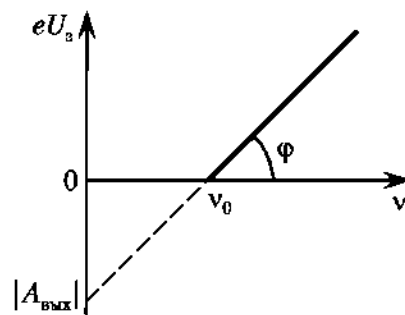


Рис. 9.4

Формула Эйнштейна продуктивна еще и в том, что позволяет *независимым от теплового излучения* методом определить постоянную Планка.

ВОПРОС. Каким образом?

ОТВЕТ. Выражая в формуле (9.5) второй член правой части в виде eU_s и подставляя соотношение (9.6), получаем $h = eU_s/(\nu - \nu_0)$. Измеренное таким образом значение h совпало с уже известной постоянной Планка! Из формулы (9.5) нетрудно получить и значение $A_{\text{вых}}$.

Все это блестяще подтвердило гипотезу Эйнштейна, упрочило позиции квантовой идеи Планка и открыло путь к совершенствованию фотоэлектрических приборов. Их достоинство в том, что они преобразуют свет в электрический ток, который легко затем усилить и применить для управления всевозможными устройствами (реле, двигатели, генераторы и т.д.).

Фотоэффект важен и для преобразований принимаемой глазом визуальной информации. Различные точки предмета по-разному отражают падающий на него свет, в том числе в зависимости от его частоты. Кроме того, левый и правый глаза сопоставляют свет, приходящий из одной и той же точки предмета, с разными фазами, что позволяет видеть его объемно. Однако у зрения есть ограничения: по частотному диапазону, чувствительности, объему информации, скорости ее восприятия и т.д. Зрению недоступны слишком малые или слишком отдаленные предметы, поэтому глаз дополняют микроскопом, телескопом и телекамерами, которые широко применяют, в том числе в военной технике.

Принцип работы телевидения, родоначальником которого был русский инженер В. К. Зворыкин (в 1919 г. эмигрировавший в США), состоит в следующем. Оптическое изображение объекта проецируют на плоский фотокатод передающей телевизионной трубки. Число фотоэлектронов, вылетевших из разных его точек, пропорционально интенсивности света, отраженного от соответствующих точек предмета. Совокупность фотоэлектронов составляет электронный код оптического изображения, которым модулируют несущую электромагнитную волну. В отдаленном телевизионном приемнике принятый сигнал после усиления модулирует интенсивность электронного луча, сканирующего по люминофору экрана. В результате каждая его точка светится с соответствующей интенсивностью, формируя исходное изображение.

Развиваясь как «продолжение глаза», разнообразная оптика, в том числе военная, долгое время была ориентирована лишь на видимый диапазон — часть спектра, порождаемую веществом при температурах $t \sim 10^3^\circ\text{C}$. В то же время большинство объектов наблюдения, принадлежащих к миру *Homo sapiens*, находится в гораздо более скромном температурном диапазоне $\Delta t = \pm 50^\circ\text{C}$. Даже при температурах $\sim 500^\circ\text{C}$ все излучение лежит в ИК-диапазоне, а вакуумная лампа с вольфрамовой нитью, раскаленной до 2500°C , созданная для оптического (!) диапазона, имеет максимум спектральной плотности излучения при 1,15 мкм. Это диктует необходимость в средствах видения в ИК-области, которых лишен человек, и особенно — в военном деле.

Уже во время Второй мировой войны в немецкой и американской армиях на базе имеющихся разработок началось применение приборов ночного видения (ПНВ). Американские войска использовали ПНВ в виде ночных прицелов, а вермахт стал применять их в ночных действиях техники, к которым его вынудили усиленные дневные бомбардировки 1944—1945 гг. Ночные перемещения немецких танковых колонн и их атаки вынуждали советские войска освещать поле боя зенитными прожекторами.

Первый ПНВ был разработан фирмой «Филипс» в 1930-е гг. и далее совершенствовался. Один из промежуточных вариантов *электронно-оптического преобразователя* (ЭОП) совмещал функции передающей и приемной телевизионной трубки (не напрасно в этих работах принимал участие и В. К. Зворыкин). Изображение объекта 1 (рис. 9.5) фокусируется оптической системой 2 на полупроводниковый фотокатод 3, нанесенный с внутренней стороны на переднюю стенку вакуумной колбы ЭОП. Фотокатод ПНВ, чувствительный в ИК-области спектра, представлял собой мозаику из мелких ($\sim 10^{-5}$ м) серебряно-кислородно-цезиевых зерен. Поскольку число фотоэлектронов, освобожденных из каждого зерна, пропорционально падающему на него световому потоку, возникает электронный аналог оптического изображения. Для превращения фотоэлектронов в видимое изображение они ускоряются системой 4 и фокусируются на люминофор экрана 5. Удары электронов возбуждают люминофор, и он воспроизводит то же изображение уже в видимой области — тем большей интенсивности,

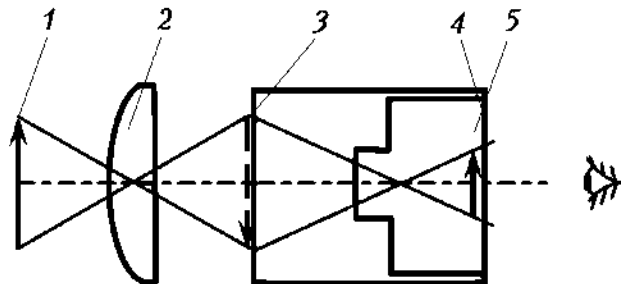


Рис. 9.5

чем больше электронов попало в данную точку. Это и создает яркостный контраст, адекватный изображению исходного объекта.

В военном деле ПНВ — очки, бинокли, прицелы и т.д. — позволяют видеть и фотографировать в темноте, создавать охранные системы, обнаруживать раненых под завалом, наличие и вид военно-технических устройств. Чувствительность некоторых ПНВ позволяет обходиться без демаскирующей наблюдателя инфракрасной подсветки. Для повышения чувствительности применяют не один прибор, а их каскад, где свечение люминофора предыдущего ЭОП является предметом отображения для следующего ЭОП. Если однокамерный ЭОП имеет коэффициент усиления $\sim 10^2$, то трехкамерный — $\sim 10^5$. Такая чувствительность позволяет видеть предметы, подсвеченные одним только звездным небом.

9.4. Эффект Комптона

Идея Эйнштейна о столкновении фотонов с электронами вещества получила расширение при решении проблем рассеяния рентгеновских лучей. В экспериментах американского физика А. Комптона (1892—1962, Нобелевская премия 1927 г.) излучение рентгеновской трубки 1 (рис. 9.6, а) после прохождения через вещество 2 (графит, парафин и т.д.) попадало в анализатор 3, ориентируемый под разными углами по отношению к направлению падающего пучка.

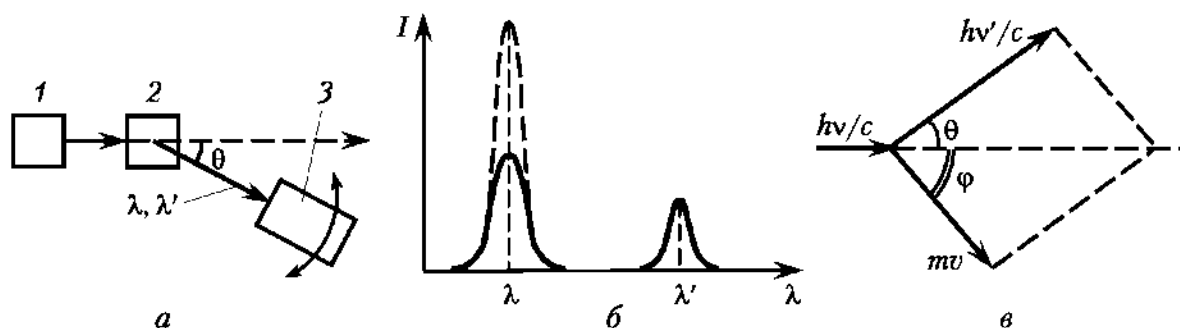


Рис. 9.6

На рис. 9.6, б пунктиром показана интенсивность *первичного* излучения с длиной волны λ , а сплошными кривыми — интенсивность *вторичного* излучения вещества, в котором, кроме исходного компонента с длиной волны λ , обнаружилось излучение с длиной волны λ' . При этом соотношение интенсивностей компонентов λ и λ' зависело от угла рассеяния θ . Как и законы фотоэффекта, это противоречило представлению, что вторичные излучатели совершают вынужденные колебания с частотой, *равной частоте волны*.

Комптон и независимо от него физик нидерландского происхождения (работавший в разных странах) П. Дебай (1884—1966, Нобелевская премия 1936 г.) предположили: если свет — это действительно фотоны, то их взаимодействие с электронами вещества должно быть подобно *упругому удару частиц*.

ВОПРОС. Если при ударе фотон передает электрону часть своей энергии, то как проявится ее уменьшение?

ОТВЕТ. В виде уменьшения частоты ν , т.е. увеличения λ .

Для количественного анализа необходимо знать массу и импульс фотона. Из сопоставления формул $E = h\nu$ и $E = mc^2$ получаем

$$m = \frac{h\nu}{c^2}, \quad p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (9.7)$$

Поскольку фотон всегда имеет скорость c (в вакууме), его масса покоя равна нулю. Электрон по сравнению с фотоном можно считать неподвижным, т.е. его исходный импульс равен нулю, а энергия равна m_0c^2 . После столкновения электрон приобретает импульс mv (рис. 9.6, θ) и энергию mc^2 , где $m = m_0/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$. Из законов сохранения энергии и импульса на основании рис. 9.6, θ получаем

$$h\nu + m_0c^2 = h\nu' + mc^2, \quad \frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} \cos \theta + mv \cos \varphi, \quad \theta = \frac{h\nu'}{c} \sin \theta - mv \sin \varphi.$$

Решая эти уравнения, находим выражение для $\Delta\nu = \nu - \nu'$ или $\Delta\lambda$:

$$\Delta\lambda = \lambda_c(1 - \cos \theta), \quad (9.8)$$

где $\lambda_c = h/(m_0c) = 2,42 \cdot 10^{-6}$ мкм — **комптоновская длина волны** электрона.

Весьма интересный результат: $\Delta\lambda$ не зависит ни от вида вещества, ни от исходной длины волны λ , а зависит *только от угла рассеяния*. И этот результат в точности совпал с экспериментальными данными!

Взаимодействующие с фотонами электроны называют **электронами отдачи** — по аналогии с явлением отдачи в механике. Если они *свободны* либо *связаны слабо*, то понятно, почему вид вещества не имеет значения. Если же энергия связи электрона с атомом больше энергии фотона, то последний взаимодействует уже не с электроном, а с системой электрон — ядро как с целой. Ее масса много больше, чем фотона, и потому он отскакивает от нее, практически не изменяя своей энергии. Поскольку в веществе присутствуют и свободные, и связанные электроны, то возникает рассеяние с обеими длинами волн (частотами).

Имея гораздо меньшее прикладное значение, чем фотоэффект, эффект Комптона оказался тем не менее еще одним ярким доказательством квантовой природы электромагнитного излучения. Кроме того, он обеспечил еще один, *независимый*, способ измерения постоянной Планка, которая оказалась, таким образом, фундаментальной константой, определяющей соотношение непрерывности и дискретности, издревле занимавшее умы. Пифагор, например, полагал, что суть всех явлений должна выражаться целыми числами, а Аристотель утверждал обратное: «Природа не делает скачков». В природе множество примеров дискретности. Масса тела состоит из «квантов» масс структурных единиц (молекул), электрический заряд суммирует «кванты» элементарных зарядов и т.д. Что касается света, то длительный период торжества его *волновой* теории, основанной на представлении о непрерывности, существенно мешал перестроить мышление.

За три века до этого у Ньютона также были дуалистические высказывания в отношении природы света, но теперь дуализм обрел *количественную* основу. С легкой руки У. Брэгга (1890—1971, Нобелевская премия 1915 г. — самый молодой лауреат этой премии в области физики) среди физиков бытовала грустная шутка, что свет представляет собой волну по понедельникам, средам и пятницам, фотоны — по вторникам, четвергам и субботам, а по воскресеньям мы пытаемся во всем этом разобраться.

9.5. Волны де Бройля и волновая функция. Уравнение Шредингера

Проблему квантово-волнового дуализма обострила смелая и оригинальная идея французского физика Луи де Бройля (1892–1987, Нобелевская премия 1929 г.). Если волны имеют свойства частиц, почему не предположить и обратное: частицы имеют свойства волн? Такие идеи симметрии быва­ют плодотворными (вспомним уравнения Максвелла). Ту же формулу (9.7) де Бройль представил с новым акцентом:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}. \quad (9.9)$$

Эта, казалось бы, элементарная школьная операция с дробью несла в себе революционное физическое содержание: частице с массой m и скоростью v соответствует некая длина волны λ . Американцы К. Дэвиссон (1881–1958, Нобелевская премия 1937 г.), Л. Джермер (1896–1971) и английский физик Дж. П. Томсон (1892–1975, Нобелевская премия 1937 г.) получили неожиданное подтверждение идеи де Бройля! Дэвиссон и Джермер изучали рассеяние электронов на никеле. В результате аварии он стал монокристаллическим, т.е. приобрел правильную структуру, и электроны дифрагировали на нем, словно волны. Наука богата подобными открытиями, если пытливый ум не проходит мимо неожиданных результатов.

Для электрона, ускоренного напряжением U , получаем $mv^2/2 = eU$ и

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2emU}} = \frac{1,225}{\sqrt{U}} \text{ нм}, \quad (9.10)$$

где последнее выражение получено подстановкой значений заряда и массы электрона. Именно такая длина волны и проявилась в экспериментах. Немецкие физики О. Штерн (1888–1969, Нобелевская премия 1943 г.) и И. Эстерман (1900–1973) обнаружили дифракцию и у тяжелых частиц — нейтронов, протонов и даже атомов. В результате пучки частиц стали применять наряду с рентгеновскими лучами для изучения структуры вещества. Преимущество электронного микроскопа перед оптическим — в гораздо меньших длинах волн λ , позволяющих видеть даже отдельные атомы. В то же время открытие волновой природы частиц породило кардинальную теоретическую проблему: оно поставило под сомнение динамику Ньютона! Не выдержав испытания большими скоростями, классическая динамика была заменена теорией относительности. Теперь она подверглась испытанию микромиром, где частицы расплываются в волны, и говорить об их положениях и траекториях становится невозможно. Это выглядело крушением основ.

Решение проблемы нашел в 1926 г. австрийский физик Э. Шредингер (1887–1961, Нобелевская премия 1933 г.) в виде уравнения, позволяющего определять эволюцию таких волн в пространстве и времени. Как и уравнения Ньютона или Максвелла, **уравнение Шредингера** не выводится, а постулируется (на основе логического анализа экспериментальных фактов). В простейшем случае оно имеет вид

$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - U(x, t)\psi = -i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}, \quad (9.11)$$

где $U(x, t)$ — потенциальная энергия частицы массой m ; i — мнимая единица. Уравнение (9.11) определяет **волновую функцию** ψ частицы, зависящую от времени и координаты x . В более общем случае учитывают производные и по другим координатам.

В *стационарных* условиях ψ и U от времени не зависят, и поэтому дифференциальное уравнение (9.11) становится однородным:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0, \quad (9.12)$$

где E — полная энергия системы. Значения функции ψ , удовлетворяющие уравнению Шредингера, называются **собственными функциями**, а значения энергии E , при которых существуют решения этого уравнения, называются **собственными значениями** (см. параграф 7.1).

Для понимания их смысла рассмотрим частицу, которая не взаимодействует с другими. Тогда $U = 0$, и решение уравнения (9.11) принимает вид

$$\psi = A \sin \left(\frac{E}{\hbar} t - \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} x + \alpha \right), \quad (9.13)$$

в чем легко убедиться, подставив его в уравнение (9.11). Из сопоставления выражений (9.13) и (7.70) очевидно, что это уравнение плоской волны. Следовательно, коэффициент при t есть ее частота ω , откуда $E = \hbar\omega = h\nu$, а коэффициент при x — волновое число $k = 2\pi/\lambda$, откуда следует равенство (9.9). Таким образом, уравнение Шредингера привело к двум пражним замечательным достижениям — Планка и де Бройля, которые были постулированы интуитивно, «ниоткуда».

9.6. Единство «волна — частица»

Итак, волны ведут себя как частицы, а частицы — как волны. Чтобы привести эту двойственность к какому-либо взаимному соответствию, сопоставим описания какого-либо проявления света на двух этих разных основаниях. Например, освещенность $d\Phi/dA$ (см. параграф 7.8) определяется на волновом языке как ωc , где ω — плотность энергии электромагнитной волны, а на квантовом языке — как $n h\nu$, где n — число квантов с энергией $h\nu$, падающих в единицу времени на единичную площадь. Отсюда

$$n h\nu = \epsilon \epsilon_0 E_m^2 c. \quad (9.14)$$

Если пользоваться, например, зеленым светом, то при норме освещенности 50 лк на 1 см² поверхности падает $\sim 10^{13}$ фотонов в секунду. Если же довести поток света до минимума, то в «фотонном газе» должны возникнуть *флуктуации*, обсужденные, например, для молекул в разных половинах сосуда (см. параграф 4.1). Поскольку флуктуаций фотонов никогда не наблюдали, потребовался специальный эксперимент. Немецкий физик В. Боте (1891—1957, Нобелевская премия 1954 г.) провел его с рентгеновскими фотонами, которые могут себя проявлять в актах ионизации газа, фиксируемых газоразрядным счетчиком, и эксперимент подтвердил наличие флуктуаций света!

Тогда возникает вопрос о смысле амплитуды E_m волны: как соотносятся *непрерывное* ее убывание в правой части формулы (9.14) и *дискретные* из-

менения — в левой? Из экспериментов В. Боте следует, что плотность n потока фотонов — понятие *статистическое*. Например, $n = 6 \text{ см}^{-3}$ справедливо только как *усреднение* за большое время. В течение малого промежутка Δt_1 может оказаться $n = 2$, за Δt_2 — $n = 0$, за Δt_3 — $n = 11$ и т.д. Иными словами, плотность n фотонов пропорциональна вероятности P их нахождения в единичном объеме в окрестностях данной точки: $n \sim dP/dV$. Тогда из формулы (9.14) следует

$$dP \sim E_m^2 dV, E_m^2 \sim dP/dV. \quad (9.15)$$

Это выражение позволяет интерпретировать световую волну совершенно необычным образом: *квадрат амплитуды напряженности поля световой волны пропорционален вероятности попадания фотона в единичный объем в окрестностях данной точки*.

Для лучшего понимания такой интерпретации поставим мысленный эксперимент. Пусть по сферической волновой поверхности (с точечным источником света в ее центре) равномерно распределено множество устройств, каждое из которых щелкает при попадании в него фотона. Это могут быть, например, фотоумножители (ФЭУ), описанные в параграфе 10.6. Поскольку на волновой поверхности $E_m^2 = \text{const}$, то из формулы (9.15) следует, что вероятность обнаружения фотона в *любой* ее точке одна и та же.

ВОПРОС. Почему же тогда при малом световом потоке щелкают лишь отдельные динамики?

ОТВЕТ. Потому что фотон — компактное образование, которое не может «размазаться» по всей сфере (всем ФЭУ) одновременно. Он может быть зарегистрирован только как единое целое, а по датчикам распределена лишь *вероятность* его регистрации. Если такой эксперимент проводить *достаточно долго*, то частота срабатывания всех ФЭУ окажется в *среднем* одинаковой. Такой же результат мы получим и за короткое время, если фотонов много (равномерный гул динамиков).

Подтверждение такого вероятностного толкования волны следует не только из эксперимента В. Боте, но и из «симметричного» ему эксперимента советских физиков Л. Бибермана, Н. Сушкина и В. Фабриканта (1949 г.). Если Дж. П. Томсон пропускал через пленки сравнительно интенсивные электронные пучки, то здесь сквозь фольгу пролетали только *отдельные* электроны. Каждый из них давал *одну* точку почернения на пластинке, положение которой было случайным, однако *совокупность* точек, полученная за длительное время, выстраивалась в такие же закономерные дифракционные кольца, какие наблюдал Томсон.

Световая волна для фотона имеет тот же смысл, что и волновая функция ψ для любой другой микрочастицы. И этот смысл — вероятностный. Такое толкование волновой функции предложил немецко-британский физик М. Борн (1882—1970, Нобелевская премия 1954 г.), и именно оно оказалось тем связующим звеном, которое «сшило» корпускулярные и волновые проявления микробъектов. Имея все признаки обычной волны, функция ψ претерпевает интерференцию и дифракцию. Фотон, электрон или любая иная микрочастица с *наибольшей вероятностью* попадет в то место экрана, где возникает ее дифракционный максимум.

9.7. Соотношение неопределенностей

Итак, неопределенность характеристик микрочастиц, диктуемая квантовой механикой, оказалась доступной количественной оценке! Если электрон попал на диафрагму D от *далекого* источника (рис. 9.7), то можно *точно* утверждать, что до диафрагмы компонент его импульса $p_x = 0$, но о его координатах по пути к диафрагме никакой информации нет. При желании зафиксировать его координату можно воспользоваться своеобразным «штангенциркулем» — отверстием в диафрагме: если электрон попал на экран \mathcal{E} , то, значит, в плоскости диафрагмы он имел координату $x \pm \Delta x/2$.

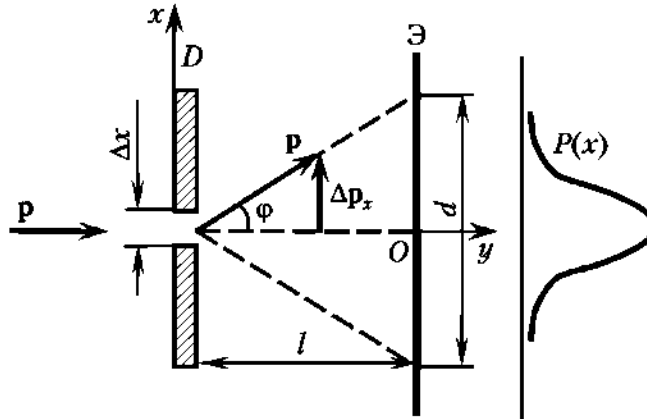


Рис. 9.7

Однако стоит это сделать, как сам факт измерения (т.е. условия наблюдения) сразу вносит коррективы в его результат. Вследствие дифракции на отверстии электрон окажется теперь на экране не напротив него, а где-то в пределах угловой ширины центрального дифракционного максимума (максимумами более высоких порядков пренебрегаем). На корпускулярном языке это означает, что у электрона появилась составляющая $\Delta p_x = p \sin \varphi$ (см. рис. 9.7). Ширина дифракционного максимума (см. параграф 8.4) $\sin \varphi = \lambda / \Delta x = h / (p \Delta x)$, где учтено соотношение (9.9). Из этих двух выражений имеем $\Delta p_x \Delta x = h$, или, при более точном выводе,

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar. \quad (9.16)$$

Это **соотношение неопределенностей** получил немецкий физик В. К. Гейзенберг (1901–1976, Нобелевская премия 1932 г.): *произведение неопределенности координаты и неопределенности импульса не меньше постоянной Планка*.

Чем точнее определена координата x (меньше Δx), тем меньше мы знаем об импульсе (больше Δp_x), и наоборот. Физически это означает, что акт измерения координаты требует *взаимодействия* с частицей, которое влияет на ее импульс. Но, может быть, «штангенциркуль» диафрагмы слишком груб, и взаимодействие можно если не устранить, то минимизировать? Размышляя в этом направлении, В. Гейзенберг предложил мысленный эксперимент. Для определения координаты частицы ее пужно хоть как-то «увидеть», т.е. *осветить* как минимум одним фотоном. Однако это сразу вносит погрешность в определения координаты: $\Delta x \approx \lambda$. Кроме того, при такой операции фотон передает электрону импульс, определяемый формулой (9.7), что снова приводит к выражению (9.16).

Итак, *любое наблюдение изменяет само явление*, и устранить это невозможно *в принципе*. Еще более сложный для понимания вариант прохождения электрона через диафрагму рассмотрен в параграфе 12.6.

Соотношения типа (9.16) справедливы не только для координаты и импульса, но и для других пар связанных друг с другом величин. Пользуясь тем, что энергия частицы $W = p^2/(2m)$, а координата $x = pt/m$, нетрудно преобразовать формулу (9.16) к виду

$$\Delta W \Delta t \geq \hbar. \quad (9.17)$$

Для лучшего понимания формулы (9.17) рассмотрим пример из области макроскопических измерений. Чувствительные аналитические весы представляют собой колебательную систему: чем точнее измерение массы, тем больше время успокоения весов. И наоборот: быстро успокаивающимися грубыми весами можно сократить время измерений, но с большей неопределенностью массы.

Как следует из параграфа 1.2, при появлении всякой принципиально новой теории требуется оценить выполнение принципа соответствия. В данном случае это может служить индикатором границы применимости классической и квантовой механики. Для тела с $m = 1$ г и $v = 100$ м/с из формулы (9.9) получаем $\lambda \approx 10^{-32}$ м — пренебрежимо малую величину, которая практически исключает значимость волновых проявлений и неопределенности x и p . Это относится не только к таким макрообъектам, как летящая пуля, но и к тем микрообъектам, положение которых ограничено макроскопическими масштабами. Если расстояние от источника электронов до экрана электронно-лучевой трубки $l \sim 0,2$ м, ускоряющее напряжение $U \sim 10^4$ В, а пятно на экране $d \sim 10^{-5}$ м, то из рис. 9.7 следует $\Delta p_x/p = d/2l$. Подставляя данные, получим $p \approx 5 \cdot 10^{-23}$ кгм/с, $\Delta p_x \approx 10^{-27}$ кг·м/с. Тогда из формулы (9.16) следует, что $\Delta x \approx 10^{-7}$ м. Как видим, отклонения от классической механики ничтожны, и вполне можно пользоваться уравнениями Ньютона. Однако при переходе к масштабам порядка дебройлевской длины волны все изменяется кардинально.

9.8. Квантовая теория водородоподобного атома

Квантовый характер электромагнитного излучения в виде наборов отдельных частот был известен и до появления квантовой механики. Линейчатые спектры излучения атомарных газов были даже систематизированы. Например, швейцарский физик И. Бальмер (1825—1898) нашел эмпирическую формулу для спектра атома водорода (серия Бальмера, 1885 г., рис. 9.8).

Очевидно, что особенности излучения следует искать в его источнике, т.е. в атоме вещества. О том, что атом нельзя считать неделимым, т.е. он имеет внутреннюю структуру, свидетельствовало открытие рентгеновских лучей, электрона, радиоактивности и особенно — эксперименты 1911 г. британского физика (родом из Новой Зеландии) Э. Резерфорда (1871—1937). Последние опровергли модель Дж. Дж. Томсона 1903 г., полагавшего, что атом представляет собой сплошную положительно заряженную сферу с вкрапленными в нее электронами (словно булка с изюмом). Резерфорд убедительно доказал, что атом в основном пуст, а весь его положительный заряд и (в основном) масса сосредоточены в ядре размером $\sim 10^{-15}$ м. Нобе-

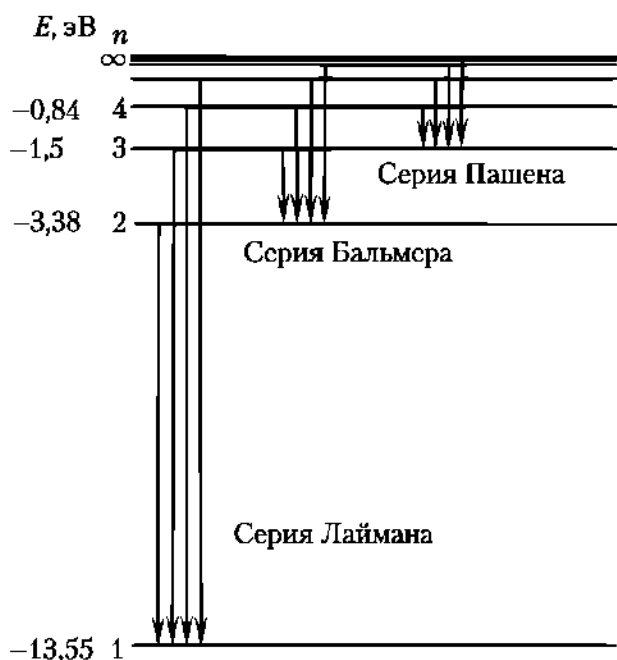


Рис. 9.8

левская премия была присуждена Резерфорду до этого (1908 г.), но в результате названных, весьма значимых опытов он стал президентом Лондонского королевского общества (аналог академии наук). Тем не менее модель Резерфорда оказалась внутренне противоречивой.

Во-первых, его атом неустойчив: притягиваясь к ядру, электроны должны были бы на него упасть. Резерфорд предположил, что этому препятствует их вращение *по орбитам*, при котором центробежная сила компенсирует кулоновскую — центростремительную. Такая **планетарная модель атома** напоминает Солнечную систему (первым, хотя и без обоснования, ее предложил немецкий физик В. Вебер еще в 1871 г.!). Однако и эта модель ситуацию не спасает. В соответствии с законами электродинамики электроны, движущиеся с центростремительным ускорением, обязаны *излучать электромагнитные волны*. В результате они должны терять энергию и все-таки упасть на ядро (то же происходит со спутником Земли вследствие потерь энергии на трение о воздух).

Во-вторых, излучение атомов в их нормальном состоянии не наблюдается вообще. Из этого следует, что электроны по орбитам не движутся.

В-третьих, если излучение атомарного газа и возникает, то выглядит оно вовсе не так, как это следовало бы из планетарной модели. Плавное уменьшение радиуса орбиты должно было бы привести к *монотонному* увеличению частоты излучения, т.е. к *сплошному* спектру, а наблюдаемый спектр — *линейчатый*.

Для снятия всех этих противоречий выдающийся датский физик Н. Бор в 1913 г. также привлек квантовую теорию (идея пришла к нему во сне). Чтобы совместить ее с успехом Резерфорда, он выдвинул несколько постулатов:

- в атоме существуют стационарные состояния (орбиты), находясь в которых, он не излучает энергию;
- при переходе атома из одного стационарного состояния в другое происходит испускание или поглощение атомом кванта электромагнитного поля:

$$\Delta E = E_n - E_m = h\nu, \quad (9.18)$$

где E_n, E_m — энергии атома в двух стационарных состояниях (на разных орбитах электрона); ν — частота излучения при переходе электрона с орбиты на орбиту. Если $E_n > E_m$, то происходит **излучение фотона**, если $E_n < E_m$, то **поглощение фотона** с такой же энергией.

Еще один постулат относился к моменту импульса электрона, находящегося на стационарных орбитах. Впоследствии оказалось, что на них укладываются целое число открытых позже волн де Бройля: $2\pi r_n/\lambda = n, n = 1, 2, 3, \dots$. Совместно с формулой (9.9) это приводит к квантованию момента импульса электрона:

$$L_n = m_e v r_n = n\hbar, n = 1, 2, 3, \dots \quad (9.19)$$

Поскольку полная энергия электрона (сумма кинетической и потенциальной энергий) $E = m_e v^2/2 - e^2/(4\pi\epsilon_0 r_n)$, а центростремительная кулоновская сила $e^2/(4\pi\epsilon_0 r_n^2) = m_e v^2/r_n$, то отсюда радиусы орбит и соответствующие им энергии равны

$$r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2} n^2, E_n = -\frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2 n^2}, n = 1, 2, \dots \quad (9.20)$$

Подставляя постоянные, найдем для первой орбиты атома водорода $r_1 \approx 0,5 \cdot 10^{-10}$ м, что совпало с молекулярно-кинетическими и рэзерфордскими оценками! В то же время формула (9.20) определяет совокупность тех **энергетических уровней атома**, на которых он может находиться (см. рис. 9.8). Как очевидно из рис. 9.8, с ростом n они все ближе друг к другу, т.е. ΔE все меньше.

При $n \rightarrow \infty E_n = 0$, что соответствует высвобождению электрона из атома (внутри атома $E_n < 0$). Самый низкий уровень энергии называется **основным**, или **нормальным, состоянием** (уровнем). Именно в этом состоянии атом обычно и находится. Более высокие энергетические состояния (уровни) называются **возбужденными** — они возникают в результате *поглощения энергии* удара, кванта излучения и т.д. В таком состоянии атом долго находиться не может и самопроизвольно (или, как говорят, спонтанно) возвращается в основное состояние, излучая квант энергии.

Возможные частоты излучения следуют из формул (9.18) и (9.20):

$$\nu = \frac{1}{h}(E_n - E_m) = \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (9.21)$$

Расчет по этой формуле подтвердил измерения Бальмера и предсказал спектральные серии атома водорода, обнаруженные затем Т. Лайманом, Ф. Пашеном и другими спектроскопистами (см. рис. 9.8). Это был настоящий триумф Н. Бора (1885—1962, Нобелевская премия 1922 г.). Для проверки его теории немецкие физики Д. Франк и Г. Герц провели эксперименты с парами ртути и другими газами. В трубке, наполненной ртутью при давлении ~ 1 мм рт. ст., из раскаленного катода К вылетают электроны и ускоряются напряжением U к сетчатому электроду С (рис. 9.9, а). По пути они сталкиваются с атомами ртути. Часть электронов оседает на сетке, а часть, пролетев сквозь ее отверстия, попадает в слабое тормозящее поле между сеткой С и анодом А ($\phi_C - \phi_A \approx 0,5$ В).

Электроны, попавшие на анод, создают ток I , измеряемый гальванометром. Зависимость $I(U)$ показана на рис. 9.9, б.

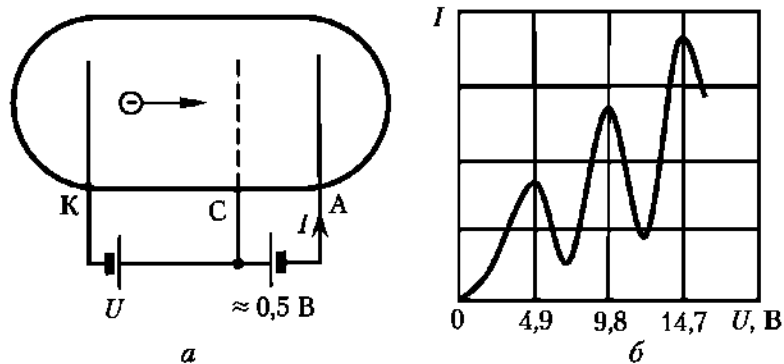


Рис. 9.9

ВОПРОС. Чем объяснить волнистость зависимости $I(U)$?

ОТВЕТ. При $U < 4,9$ эВ энергии свободных электронов недостаточно для возбуждения атома ртути, и поэтому они сталкиваются с атомами упруго, практически не теряя своей энергии (так как масса электрона много меньше массы атома). Чем больше U , тем больше энергия электронов, достигших сетки С. Соответственно, большее их количество преодолевает тормозящее поле между С и А, поэтому ток I растет. При $U > 4,9$ В многие электроны уже способны своими ударами возбудить атомы, теряют энергию на неупругие удары и уже не могут преодолеть тормозящее поле, и ток уменьшается.

Если это предположение верно, то при спонтанном возврате в основное состояние возбужденные атомы должны излучать свет! И действительно, в ультрафиолетовой области было обнаружено излучение ртути именно с таким $h\nu$, которое соответствует энергии 4,9 эВ. Тем самым Франк и Герц убедительно подтвердили модель Бора, за что получили Нобелевскую премию (1925 г.).

И все же количественные результаты теории Бора оказались верны только для водорода и водородоподобных ионов (у которых остался один электрон). Более того, даже успех с водородом впоследствии показался странным. Дело в том, что при всех своих несомненных достоинствах теория Бора *внутренне противоречива*, поскольку совмещает несовместимое — квантовые скачки с представлениями классической физики о траекториях (орбитах). Атом — это слишком маленький объект ($\sim 10^{-10}$ м), в котором о точных координатах говорить уже нельзя. Поэтому, несмотря на то что теория Бора сыграла огромную роль в становлении современной физики, а ее представления об энергетических уровнях актуальны и поныне, для количественных расчетов следует все же пользоваться уравнением Шредингера.

9.9. Гармонический осциллятор

Сделаем это на примере струны длиной l , за пределы которой частица выйти не может. Иными словами, она находится в области, ограниченной непреодолимым потенциальным уступом, которую образно называют *бесконечно глубокой потенциальной ямой*: при $0 \leq x \leq l$ потенциальная энергия частицы $U = 0$, а вне ямы, при $x < 0$ и $x > l$, $U = \infty$ (рис. 9.10).

В *стационарных* условиях справедливо уравнение (9.12), а его решение имеет вид

$$\psi = A \sin \left(\frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} x + \alpha \right), \quad (9.22)$$

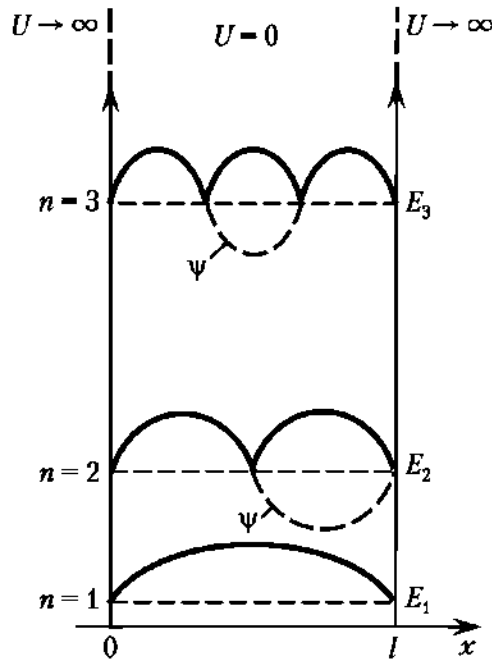


Рис. 9.10

что легко проверить его подстановкой в уравнение. Поскольку функция ψ непрерывна, то при $x = 0$ и $x = l$ она должна обращаться в нуль при подходе к границам как извне, так и изнутри ямы. Тогда из равенства (9.22) следует $\psi(0) = A \sin \alpha = 0$, т.е. $\alpha = 0$:

$$\psi(l) = A \sin \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} l = 0, \quad \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} l = \pm n\pi, \quad n = 1, 2, \dots \quad (9.23)$$

Сравнивая соотношения (9.23) и (9.9), приходим к выводу, что существование частицы в струне возможно только в случае, если на ее ширине укладывается целое число полувольт де Бройля, т.е. условие (9.23) имеет ровно тот же смысл, что и для стоячих волн в струне с закрепленными концами (см. параграф 8.3). Из соотношения (9.23) следует также вывод о квантовании энергии частицы:

$$E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} n^2, \quad \Delta E = E_{n+1} - E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} (2n+1) \approx \frac{\pi^2 \hbar^2}{ml^2} n, \quad n = 1, 2, \dots \quad (9.24)$$

Иные значения энергии частицы невозможны!

При $l \sim 0,1$ м получаем для электрона $\Delta E \approx 10^{35} n$ Дж = $10^{16} n$ эВ. Столь ничтожной величиной можно пренебречь, полагая, что энергия изменяется практически непрерывно, тем более для больших n . Это и является одной из основ классической физики.

Поскольку из соотношений (9.24) следует, что $\Delta E/E \approx 2/n$, то с ростом n энергетические уровни сближаются, и при $n \rightarrow \infty$ квантование энергии выходит за пределы погрешностей измерений и вычислений. На основе этого и был впервые сформулирован принцип соответствия (Н. Бор, 1923 г.): при больших квантовых числах n результаты квантовой механики должны соответствовать результатам классической.

Пусть теперь $l \sim 10^{-10}$ м (размер порядка атомного). Здесь уже для электрона получаем $\Delta E \sim 10^{-17} n$ Дж ($\sim 10^2 n$ эВ). Это очень большая величина, не считаться с которой нельзя. Каждому значению n соответствует своя энер-

гия (9.24) и свой вид функции ψ (9.23): $\psi = A \sin(n\pi/l)x$. Квадрат ее модуля $|\psi|^2$ определяет плотность вероятности пребывания частицы в той или иной точке (см. рис. 9.10). Как видим, при $n = 1$ вероятность обнаружить электрон максимальна в центре ямы, при $n = 2$ — в центре каждой из ее половин и т.д., т.е. *степень неопределенности координат электрона вполне поддается расчету*. Поскольку интеграл от $|\psi|^2$ по всему объему ямы есть вероятность обнаружить в ней электрон, то он равен единице.

Рассмотрение частицы в потенциальной яме позволяет приблизиться к анализу состояния электронов в атоме.

9.10. Квантовая теория многоэлектронных атомов

Поскольку потенциальная энергия электрона в поле протона $U = -e^2/(4\pi\epsilon_0 r_n)$, то стенки потенциальной ямы уходят в бесконечность не вертикально, а в виде гиперболоидной воронки. Решение уравнения Шредингера для такой конфигурации дает значения энергии, совпадающие со значениями (9.20), где число n называют **главным квантовым числом**. Примечательно, что значения $|\psi|^2$ при разных n оказались максимальными именно при тех r_n , которые Бор считал «орбитами». Это и обусловило успех его теории. В действительности существует *неопределенность* координаты электрона, описываемая «облаком» плотности вероятности его нахождения при тех или иных координатах. Поскольку движение электрона остается ограниченным (финитным) и периодическим, он обладает моментом импульса L , который называют **орбитальным**. Это название не следует понимать буквально — оно лишь отдает дань нашему стремлению к наглядным моделям. Уже из формулы (9.19) следует, что L квантуется, но теперь этот эффект возникает как одно из условий существования решения уравнения Шредингера:

$$L = \hbar\sqrt{l(l+1)}, \quad l = 0, 1, \dots, n-1. \quad (9.25)$$

Число l , определяющее момент импульса электрона, называют **азимутальным**, или **орбитальным**, **квантовым числом**. Поскольку $l_{\min} = 0$, то и $L_{\min} = 0$, что вообразить непросто. На языке траекторий это означало бы отсутствие у траектории радиуса кривизны, что возможно при движении электрона по прямой через ядро и обратно (подобно маятнику).

Наличие механического момента импульса L у частицы, *имеющей заряд*, означает, что у нее есть и *магнитный момент* p_m . При обсуждении магнетизма (см. параграф 6.5) движение электрона в атоме представлялось в виде кольцевого тока, причем вектор p_m может быть ориентирован произвольно. Однако решение уравнения Шредингера наложило ограничение и здесь: проекции вектора p_m (или противоположного ему вектора L) электрона на любое направление z индукции внешнего магнитного поля не могут быть любыми — они также квантуются:

$$L_z = m\hbar, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l, \quad (9.26)$$

где m — **магнитное квантовое число**. Поскольку проекция L_z не может быть больше модуля L , т.е. $|m\hbar| \leq \hbar\sqrt{l(l+1)}$, то $m_{\max} = l$. Например, при $l = 2$, как следует из равенства (9.26), существует только пять способов ориентации вектора L относительно индукции B внешнего поля (рис. 9.11, а). Это под-

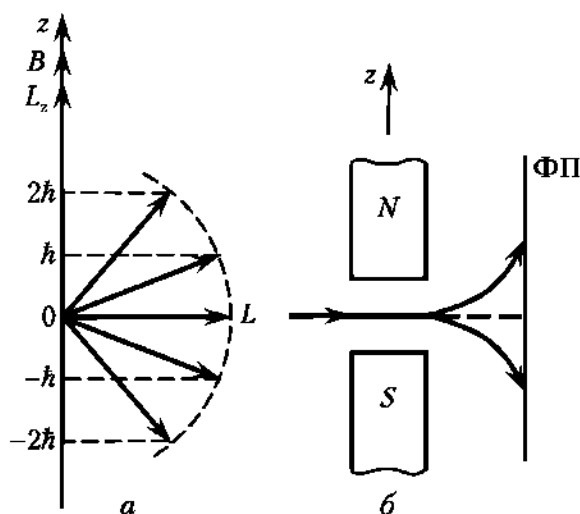


Рис. 9.11

твердили эксперименты немецких физиков О. Штерна и В. Герлаха (1889—1979) в 1922 г., в которых пучок атомов отклонялся в области неоднородного магнитного поля и попадал на фотопластинку ФП (рис. 9.11, б).

При произвольных p_{mz} отклоняющая сила стала бы принимать любые значения. В таком случае на фотопластинке должна образоваться сплошная полоса. Однако в опыте возникли четко разделенные полосы, свидетельствующие о дискретных значениях p_{mz} . Была обнаружена и дополнительная странность. Поскольку атом водорода имеет только один электрон, то для него при $l = 0$ будет $L = 0$ и, соответственно, $p_m = 0$. Однако и в этом случае наблюдались две полосы!

Американские физики С. Гаудсмит и Д. Уленбек в 1925 г. предположили, что, помимо орбитального, электрон имеет еще и собственный механический и связанный с ним *собственный магнитный момент*, который также дискретно ориентируется относительно вектора \mathbf{B} . Его назвали *спином* (от англ. *spin* — вращение), предполагая вращение электрона вокруг собственной оси. От этого представления пришлось потом отказаться, поскольку скорость вращения «поверхности» электрона, которая должна обеспечить наблюдаемый магнитный момент, была бы больше скорости света. Считается, что спин характеризует некоторую *собственную поляризацию электрона в пространстве*. Итак, магнитный момент электрона в атоме есть сумма орбитального и спинового моментов. Подобно этому Земля имеет и орбитальный, и собственный момент импульса.

В соответствии со своей природой спин L_s и его проекция L_{sz} на направление вектора \mathbf{B} определяются такими же соотношениями, как (9.25), (9.26):

$$L_s = \hbar\sqrt{s(s+1)}, \quad L_{sz} = m_s\hbar, \quad (9.27)$$

где s — **спиновое квантовое число**; m_s — **магнитное спиновое квантовое число**, возможные значения которого связаны с числом s так же, как m и l , т.е. принимают $2s + 1$ значений. Поскольку Штерн и Герлах наблюдали две полосы, существуют только две возможные ориентации вектора L_s , т.е. $2s + 1 = 2$, и, следовательно, единственно возможное значение $s = 1/2$. Соответственно, $m_s = \pm 1/2$, т.е. $L_{sz} = \pm \hbar/2$. Обычно для краткости говорят, что спин электрона $+1/2$ (в единицах \hbar), когда он ориентирован по полю, и $-1/2$ — когда ориентирован против поля.

Итак, состояние электрона в атоме определяется *набором четырех квантовых чисел*: n, l, m, m_s . В 1925 г. австрийский физик В. Паули (1900—1958, Нобелевская премия 1945 г.) сформулировал знаменитый **принцип Паули**: *в любом атоме не может быть двух электронов с одинаковым набором квантовых чисел*.

Из формул (9.25)—(9.27) следует: каждому главному квантовому числу n соответствует n значений l : от 0 до $n - 1$; каждому l соответствует $2l + 1$ значений m : от $-l$ до $+l$; каждому m соответствуют два значения спина: $+1/2$ и $-1/2$. Таким образом, каждое значение n определяет совокупность комбинаций l, m, m_s , которая образует **электронный слой**, или **электронную оболочку**: при $n = 1$ — K -слой, при $n = 2$ — L -слой и т.д. — в соответствии с латинским алфавитом. Каждое значение l образует в пределах электронного слоя **подоболочку**, или подгруппу, обозначаемую следующим образом: $l = 0$ — s -состояние (основное); $l = 1$ — p -состояние; $l = 2$ — d -состояние и далее — в соответствии с латинским алфавитом. Электронное состояние (электронную конфигурацию) атома обозначают числовым значением n и символами значений l с верхними индексами, которые указывают число электронов. Например, кислород в основном состоянии: $1s^2, 2s^2, 2p^4$, т.е. в K -слое ($n = 1$) он имеет два электрона в s -состоянии ($l = 0$) и т.д.

В соответствии с принципом Паули *по мере роста порядкового номера Z элемента в электронном слое появляются новые электроны* — обязательно в новом состоянии, т.е. хотя бы одно квантовое число должно быть иным. Согласно принципу минимума энергии заполнение состояний начинается с меньших n , а в пределах одного слоя — с меньших l . При больших n этот порядок иногда нарушается, поскольку энергия нового электрона определяется взаимодействием не только с ядром, но и с другими электронами. Как только все возможные состояния слоя с данным n заполняются, начинается заполнение слоя $n + 1$, что иллюстрирует табл. 9.1.

Таблица 9.1

Слой	Число электронов в состояниях					Максимальное число электронов
	$s (l = 0)$	$p (l = 1)$	$d (l = 2)$	$f (l = 3)$	$g (l = 4)$	
K	2	—	—	—	—	2
L	2	6	—	—	—	8
M	2	6	10	—	—	18
N	2	6	10	14	—	32
O	2	6	10	14	18	50

Максимально возможное число электронов в каждом слое нетрудно подсчитать. Так, набор всех четырех квантовых чисел n, l, m, m_s может иметь только один электрон: $z(n, l, m, m_s) = 1$. Далее: $z(n, l, m) = 2$ (два электрона с разными спинами); $z(n, l) = 2(2l + 1)$. Наконец,

$$z(n) = \sum_{l=1}^{n-1} 2(2l + 1) = [2(n - 1) + 2]n = 2n^2. \quad (9.28)$$

Всякое *заполненное* состояние имеет нулевой магнитный момент, так как содержит четное число электронов с попарно компенсированными спинами и попарно компенсированными значениями m .

Резюме

Подводя итоги настоящей главы, отметим ее основные положения.

Классическая физика оказалась не в состоянии объяснить закономерности таких явлений, как тепловое излучение, фотоэффект, рассеяние рентгеновских лучей. Это привело к появлению *квантовой* физики, описывающей микромир и породившей квантово-волновой дуализм. Его разрешение было найдено в статистической интерпретации волновой функции микрочастиц: квадрат ее модуля определяет вероятность нахождения микрочастицы в той или иной точке пространства-времени.

Квантовая физика позволила разобраться в структуре атома и объяснить явления его возбуждения, ионизации, а также процессы излучения и поглощения света.

Квантовые законы играют большую роль в природе и лежат в основе новых технологий и устройств, в том числе относящихся к ВВТ.

Вопросы для самоконтроля

1. Почему грязный снег тает быстрее, чем чистый?
2. Лампа накаливания в 150 Вт ярче лампы в 75 Вт. Почему же электроплитка мощностью 600 Вт дает мало света?
3. Как определить постоянную Планка: а) с помощью формулы де Бройля; б) с помощью уравнения Эйнштейна для фотоэффекта?
4. Ионы во много раз больше электронов. Почему же микроскопы, использующие вместо электронных ионные пучки, различают меньшие по размеру объекты?
5. Почему вероятность обнаружения цели тепловой головкой самонаведения ракеты зависит: а) от мощности двигателя цели; б) расстояния до нее; в) погодных условий?
6. По каким признакам вольтамперная характеристика фотодиода (см. рис. 9.2, б) не соответствует закону Ома?
7. Два луча с одинаковой длиной волны при нормальном падении на фотокатод оказывают на него разное давление. Какой из них вызовет больший ток насыщения? Различаются ли для них задерживающие потенциалы?
8. Способствует ли нагревание металла фотоэффекту?
9. Можно ли ионизировать атом водорода фотонами с энергией меньше 13,55 эВ?
10. Пороховые газы производят у дульного среза орудия красноватую вспышку. Влияет ли это на его КПД?

Задачи с решениями

9.1. Для того чтобы глаз, адаптированный к темноте, обнаружил вспышку света, ему достаточно на длине волны 0,55 мкм ~50 фотонов за время мигания 0,15 с. На каком расстоянии он может зафиксировать кратковременную вспышку 100-ваттной лампы, если полагать, что ее излучение происходит на этой длине волны (середине оптического диапазона)? КПД лампы — 2%, средний диаметр сетчатки глаза — 12 мм, поглощением света атмосферой пренебречь.

Дано: $\lambda = 0,55 \text{ мкм} = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$; $n = 50$; $t = 0,15 \text{ с}$; $P = 100 \text{ Вт}$; $\eta = 2 \cdot 10^{-2}$; $d = 12 \text{ мм} = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

$L = ?$

Решение. За время мигания энергия излучения точечного источника, приходящаяся на единицу площади сферического волнового фронта на расстоянии L :

$$W = \frac{P\eta t}{4\pi L^2}.$$

Число фотонов, попадающих за это время на сетчатку глаза:

$$n = \frac{W\pi d^2}{4h\nu} = \frac{P\eta t \lambda d^2}{16L^2 hc},$$

где c — скорость света. Отсюда искомое расстояние

$$L = 0,25d \sqrt{\frac{P\eta t \lambda}{hcn}}.$$

Подставляя данные, получим 387 км.

9.2. Температура нити лампы накаливания автомобильной фары 2300°C . Во сколько раз возрастает освещенность дороги, если вместо нее использовать лампу с галогенным циклом при температуре 2800°C ?

Дано: $T_1 = 2573 \text{ K}$; $T_2 = 3073 \text{ K}$.

$E_2/E_1 = ?$

Решение. Освещенность определяется выражением

$$E = \frac{I \cos \alpha}{r^2},$$

где α — угол падения луча на поверхность дороги; r — расстояние от фары до точки падения луча; I — сила света, т.е. световой поток, излучаемый источником в пределах единичного телесного угла. Он определяется мощностью излучения лампы, которая, в свою очередь, определяется законом Стефана — Больцмана

$$R = k\sigma ST^4,$$

где k — коэффициент серости; S — площадь излучающей поверхности. Полагая, что при замене лампы k , S , спектр и геометрия светового пучка остаются неизменными, найдем для каждой единичной площадки дороги соотношение

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{T_2^4}{T_1^4}.$$

Подставляя данные, получим $E_2/E_1 = 2,02$.

9.3. Поверхность тела человека в хлопчатобумажной одежде площадью $1,5 \text{ м}^2$ имеет коэффициент серости $0,73$ и температуру 24°C . Каковы потери энергии тела на излучение при температуре воздуха 17°C ? На какую длину волны должен быть настроен прибор ночного видения, ориентированный на человека, чтобы входная мощность, влияющая на качество изображения, была максимальной?

Дано: $S = 1,5 \text{ м}^2$; $T_q = 297 \text{ K}$; $T_s = 290 \text{ K}$; $k = 0,73$.

$P_{\text{пот}} = ?$; $\lambda_m = ?$

Решение. Потери энергии телом определяются разностью мощностей его излучения и поглощения. В соответствии с законом Стефана — Больцмана

$$P_{\text{пот}} = k\sigma S(T_{\text{изл}}^4 - T_{\text{погл}}^4).$$

Максимум излучаемой телом энергии приходится на длину волны, определяемую законом Вина: $\lambda_m = b/T$.

Подставляя данные, получим $P_{\text{пот}} = 44 \text{ Вт}$, $\lambda_m = 10 \text{ мкм}$.

9.4. При радиусе шара от ядерного взрыва 100 м максимум энергии его излучения пришелся на длину волны 289 нм . Определим температуру поверхности шара и энергию его излучения за 1 мс в тротиловом эквиваленте. Считаем, что за это время радиус шара измениться не успевает. При взрыве 1 кг тротила выделяется $4,2 \text{ МДж}$.

Дано: $r = 100$ м; $\lambda_m = 289$ нм = $2,89 \cdot 10^{-7}$ м; $t = 1$ мс = 10^{-3} с; $W_1 = 4,2$ МДж = $4,2 \cdot 10^6$ Дж.

T — ?; $W_{\text{трот}}$ — ?

Решение. Из закона Вина имеем $\lambda_m = b/T$, откуда $T = b/\lambda_m$.

Излучаемая шаром энергия $W = RSt$.

Поскольку $R = \sigma T^4$, а $S = 4\pi r^2$, то $W_{\text{трот}} = 4\pi\sigma T^4 r^2 t / W_1$.

Подставляя данные, получим $T = 10^4$ К; $W_{\text{трот}} = 7,1 \cdot 10^{10}$ Дж \rightarrow 17 т тротила.

9.5. Какова зависимость дальности обнаружения боевой машины от толщины ее теплоизолирующего материала с помощью ПНВ? Поверхность машины площадью S имеет без теплоизоляции температуру T , диаметр объектива ПНВ равен d , минимальный световой поток в его рабочей спектральной области должен быть больше порога чувствительности Φ_{min} , а коэффициент поглощения теплоизоляции в этой области равен μ .

Решение. Поток лучистой энергии от машины определяется законом Стефана — Больцмана: $P = \sigma ST^4$.

При наличии теплоизолирующего материала толщиной l он уменьшается в соответствии с законом Бугера: $P_{\text{из}} = \sigma ST^4 e^{-\mu l}$.

Часть этой мощности приходится на световой поток в области чувствительности ПНВ. На максимальной дальности r_{max} он определяется соотношением площади волнового фронта и площади объектива:

$$\Phi_{\text{min}} = \frac{\sigma ST^4 \pi d^2 e^{-\mu l}}{4 \cdot 4\pi r_{\text{max}}^2}$$

Отсюда

$$r_{\text{max}} = A e^{-\mu l / 2}, \quad A = \sqrt{\frac{\sigma S d^2 T^4}{16 \Phi_{\text{min}}}}$$

Задачи для самостоятельного решения

9.6. Чувствительность сурьмяно-цезиевого фотодатчика для длины волны 0,42 мкм составляет 50 мА/Вт. Сколько электронов выбивает из катода один фотон?

9.7. Тепловой имитатор боевой машины излучает 0,8 кВт при температуре 400°C. Какую площадь двигательного отсека он имитирует? На какую длину волны излучения он ориентирует тепловые головки наведения ракет противника?

9.8. Тепловой пеленгатор способен засечь 100-ваттную лампу накаливания, прикрытую теплоизолятором, на расстоянии 1 км, а без него — на расстоянии 3 км. Какую долю тепловой энергии пропускает теплоизолятор?

9.9. Сопло реактивного снаряда боевой машины калибром 140 мм излучает 900 Дж в секунду. Какова температура камеры сгорания, если считать ее абсолютно черным телом?

9.10. На поверхность металла падает свет с длиной волны 0,265 мкм. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов составляет 20% от энергии фотонов. Какова работа выхода металла?

Глава 10

ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ ТВЕДОГО ТЕЛА

Свою пустоту атомы установили, собравшись на форум в виде Резерфорда.

Эволюция — это развитие потребности наращивать потребности.

В результате изучения данной главы учащийся должен:

знать

- квантово-механические основания лазерной генерации, химической связи и спектра молекул;
- физическую сущность электропроводности, зонной теории проводников, диэлектриков и полупроводников, а также теории сверхпроводимости;
- особенности примесной проводимости полупроводников и *p-n*-перехода;
- физические основы применения полупроводниковых диодов и транзисторов;

уметь

- распознавать, вычленять и анализировать проявления изученных по теме квантовых закономерностей в объектах природы и техники;
- формулировать военно-техническую задачу с позиций изученных законов квантовой физики и применять ее аппарат для решения задачи;

владеть

- навыками применения законов квантовой физики в изученном объеме при решении военно-технических задач, сформулированных как физические;
 - навыками привлечения физических констант, справочных данных, оценки порядка величин и опоры на их размерности при решении задач квантовой физики.
-

10.1. Излучение атомов. Лазер

Физическая картина мира (см. гл. 12) определяется четырьмя фундаментальными взаимодействиями частиц материи, формирующими вещество в более или менее плотных состояниях. Одно из взаимодействий — электромагнитное. Его носителями являются фотоны. У каждого химического элемента взаимодействие с ними неповторимо так же, как отпечатки пальцев человека. Оно диктуется *индивидуальным* набором энергетических уровней, определяющих *спектр* излучения и поглощения. По нему можно судить о *присутствии* в веществе тех или иных химических элементов, чем пользуются в астрофизике, технологиях, криминалистике и т.д. Спектральный анализ обладает огромной чувствительностью, позволяющей определять примеси $\sim 10^{-11}$ г.

Варианты переходов между энергетическими уровнями атома ограничены **правилами отбора**, которые следуют из закона сохранения момента импульса. Поскольку испускаемый (поглощаемый) фотон уносит (привно-

сит) свой момент импульса порядка \hbar , то возможны только такие переходы, при которых $\Delta l = \pm 1$.

Концентрацию N_m атомов вещества в состоянии E_m называют **населенностью** энергетического уровня E_m . При поглощении фотонов, соответствующих переходу на уровень возбуждения E_n (рис. 10.1, а), формируется его населенность N_n . Затем — за время $\sim 10^{-8}$ с — атомы спонтанно (самопроизвольно) возвращаются обратно (рис. 10.1, б). При этом фотон № 2 совпадает с № 1 *только по частоте* (энергии), но не по направлению и фазе. Следовательно, *первичное и спонтанное излучения некогерентны*.

Эйнштейн показал, что наряду с этим существует и другой механизм излучения. Если электрон не успел осуществить спонтанный переход $n \rightarrow m$, то другой фотон № 1 может его к этому *вынудить* (рис. 10.1, в). Поэтому такое излучение назвали **вынужденным**, или **индуцированным** (наведенным). Фотон № 1 при этом сохраняется, а фотон № 2 является его полной копией: он имеет не только ту же *частоту*, но и такую же *поляризацию, направление и фазу*, т.е. *индуцированное излучение когерентно падающему!*

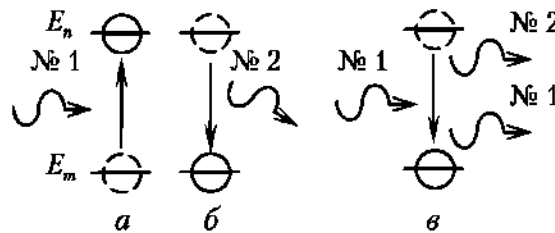


Рис. 10.1

Это обстоятельство оказалось столь важным, что Эйнштейн воскликнул: «На меня упал великолепный свет!» Найденная им зависимость интенсивности J излучения от пути l его прохождения через вещество имеет вид

$$J = J_0 \exp\left(-\frac{B}{v}(N_m - N_n)l\right), \quad (10.1)$$

где B — постоянный коэффициент; v — фазовая скорость волны в веществе. Этот результат замечателен тем, что не только совпадает с экспериментально полученным законом Бугера (8.27), но и расшифровывает природу коэффициента поглощения: $\mu = B(N_m - N_n)/v$.

Из формулы (8.27) и обширного опыта следует, что по мере прохождения через вещество интенсивность света J *всегда уменьшается*, и выражение (10.1) убедительно это обосновывает. Согласно распределению Больцмана (4.20) всегда выполняется $N_m > N_n$, т.е. чем выше энергетический уровень, тем меньше его населенность.

ВОПРОС. А к чему привело бы неравенство $N_m < N_n$?

ОТВЕТ. Показатель степени в (10.1) стал бы *положительным*, т.е. по мере прохождения через вещество интенсивность света стала бы не убывать, а нарастать! Именно такую идею высказал советский физик В. А. Фабрикант в 1939 г.: можно реализовать особую среду, в которой населенность верхнего уровня была бы больше, чем нижнего. Такую населенность назвали **инверсной** (обратной распределению Больцмана). В авторском свидетельстве В. А. Фабриканту отказали под предлогом, что реализовать его идею невозможно (оно было выдано лишь в 1951 г.). Вопреки этому заключению советским физикам Н. Г. Басову, А. М. Про-

хорову и (независимо от них) американцу Ч. Таунсу в 1954 г. такую среду удалось создать (Нобелевская премия 1964 г.). Так появились первые **лазеры** — по начальным буквам *light amplification by stimulated emission of radiation*, т.е. «усиление света вынужденным излучением».

Для создания инверсной населенности необходим особый механизм возбуждения атомов, названный **накачкой**. Он селективно (избирательно) увеличивает населенность именно данного верхнего уровня и (или) уменьшает населенность нижнего. Накачка может быть оптической, электронной, химической и т.д.

Например, с помощью мощной лампы или газового разряда многие атомы среды переводят с уровня E_1 в возбужденное состояние E_3 (рис. 10.2). Затем в результате столкновений с другими атомами или по иным причинам они переходят в относительно долгоживущее состояние на *метастабильном* уровне E_2 (см. рис. 10.2), в котором их *оказывается больше, чем в состоянии E_1* . На рисунке этот процесс показан схематично: в действительности в нем участвуют атомы *разного рода*. Например, в гелий-неоновом лазере до уровня E_3 возбуждают атомы He, а затем они передают приобретенную энергию на уровень E_2 атомов Ne, который оказывается перенаселен по сравнению с уровнем E_1 . В результате возникает индуцированное излучение с энергией квантов $\Delta E = E_2 - E_1$, которой соответствует красная линия спектра.

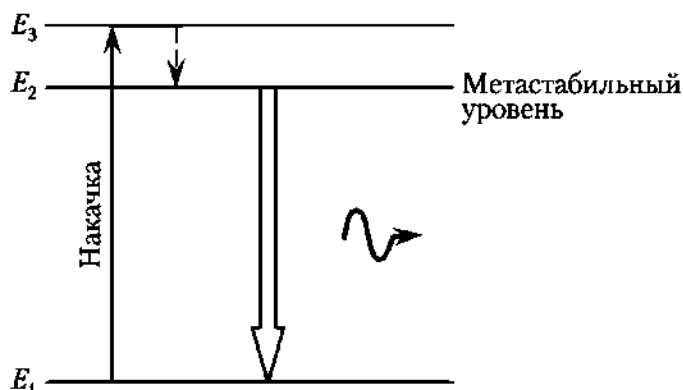


Рис. 10.2

Поскольку вероятность вынужденного испускания фотона пропорциональна *числу* фотонов, вызывающих данный процесс, в **активной среде** лазера фотоны *лавиннообразно размножаются*. Однако для получения практически значимого результата размер активной среды должен быть весьма велик. Подобная проблема периодически возникает при стремлении нарастить те или иные физические параметры, например при создании ускорителей заряженных частиц. Здесь ее разрешили с помощью того же приема, что и для ускорителей, — путем многократного локального накопления эффекта (см. параграф 6.3). В данном случае это достигается с помощью *зеркал* Z , находящихся по обе стороны элемента 1 с активной средой (рис. 10.3). Зеркала задают определенное направление OO' усиления луча (2 — устройство для накачки). Если какие-то фотоны размножаются по иному направлению, то из процесса усиления они выбывают, *покидая* активную среду резонатора. Одно из зеркал делают частично прозрачным. Через него излучение и выходит по достижении определенной мощности.

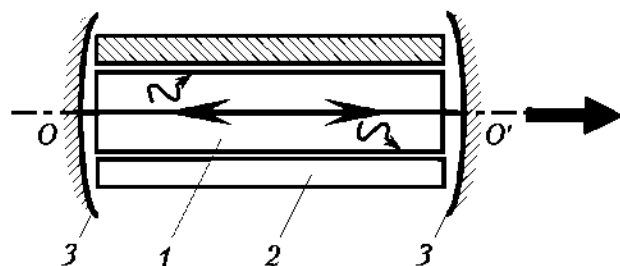


Рис. 10.3

Индуктированное излучение не только дополнило представления о квантовых переходах в атомах. Как и всякое существенное достижение физики, лазер лишь некоторое время пребывал в роли экзотической игрушки, а затем оказался востребован до такой степени, что породил целую индустрию, в том числе военной направленности.

10.2. Физические основы применения лазера

У обычного света, исходящего из любого коллиматора, например прожектора, расходимость луча относительно велика, что не позволяет освещать отдаленные объекты. У лазерного луча угол расходимости $\sim 10^{-3}$ рад, а с дополнительной фокусировкой — много меньше. Это важно в военной топографии, строительстве сооружений и мостов, а также при локации самолетов, танков, кораблей, в системах противоракетной и противокосмической обороны, глобальной навигации и т.д.

Вследствие высокой направленности луча лазер точнее, чем радиолокатор, определяет направление на цель и поэтому находит более широкое применение. Для получения погрешности направленности луча $\sim 1,5^\circ$ в сантиметровом диапазоне радиоволн нужна антенна диаметром ~ 10 м. Снабдить ею танк или самолет без потери их тактико-технических характеристик невозможно, в то время как лазер никаких антенн не требует. Это же преимущество важно и для *разрешающей способности* локатора, которая определяет возможность раздельного пеленга целей, движущихся по близким направлениям. На танках и самолетах лазерный дальномер вводят в счетно-решающую систему управления огнем, что улучшает их боевые качества, часто его используют в виде бинокля и т.д.

Направленность луча важна и при решении задач целеуказания и наведения в «умном» высокоточном оружии. Снаряд, ракета или бомба летят на яркую точку, которую отслеживает головка самонаведения. Рассогласование оптической оси головки с требуемой траекторией полета определяется по отраженному от цели лучу и преобразуется в корректирующий сигнал, вводимый в систему управления. В отличие от этого радиолокационные и тепловые (инфракрасные) головки самонаведения работают в более широкой зоне углов и потому захватывают ложные цели (пожары, осколки бомб, тепловые имитаторы и т.п.).

Точность измерения дальности L цели определяется точностью измерения длительности t паузы между излученным и принятым антенной локатора импульсом: $L = ct/2$. Она зависит от длительности импульсов. У лазеров она составляет 10^{-7} – 10^{-8} с, и потому точность определения дальности ~ 3 м, а с дополнительными мерами (даже при определении расстояния до

Луны) — $\sim 10^{-2}$ м. Здесь играет роль и монохроматичность лазерного луча, обусловленная тем, что его длина волны (частота) определяется переходом между двумя энергетическими уровнями атома. Луч обычного радиолокатора содержит различные частотные составляющие, имеющие разные скорости распространения в среде из-за дисперсии (см. параграф 8.7). Это приводит к «расплыванию» импульса в пространстве и, соответственно, к увеличению его длительности при приеме.

Остронаправленный луч лазера позволил заменить механическую основу работы гироскопов на электронно-оптическую. Луч лазера разделяют на два луча, идущих по разным направлениям. Если борт движущегося средства поворачивается вместе с лазером, то анализатор суммирования лучей движется навстречу одному из них и удаляется от другого. Соответственно для первого луча оптическая длина пути уменьшается, а для второго возрастает. В результате по смещению интерференционного максимума можно судить о вращении системы, а сигнал, пропорциональный величине смещения, использовать в качестве управляющего для восстановления ее прежнего положения.

Отсутствие вращающихся масс позволяет устранить погрешности, связанные с нестабильностью угловой скорости роторных гироскопов. Время готовности лазерного гироскопа в сотни раз меньше, чем у роторного, а при взлете и маневрах он выдерживает большие перегрузки. Весьма важно также, что его выходной сигнал легко преобразуется в цифровую форму, позволяющую сопрягать его с бортовой ЭВМ. Это существенно, например, в автоматических инерциальных системах управления авиационной и космической техники.

Поскольку мощность отраженного излучения $\sim 1/\lambda^4$ (рассеяние Рэлея), а у лазера длина волны мала, он обеспечивает существенно более мощное отражение, чем радиолокатор. Это не только способствует осуществлению пеленгации объектов малых размеров, но и позволяет получать более детальную картину объектов местности, в том числе в сложных метеоусловиях или ночью, когда фото- и телесистемы работают плохо. Технология такой съемки состоит в следующем: лазерный луч построчно сканирует местность перпендикулярно направлению полета (строчная развертка), а кадровую развертку обеспечивает движение самолета (или спутника). Отраженное излучение попадает в оптическую бортовую систему, подобную телевизионной, и создает изображение местности с разрешением в несколько сантиметров. *GPS*-привязка к местности позволяет мгновенно сравнить его с изображением в памяти компьютера и скорректировать траекторию полета. Отсюда (и не только отсюда) следует важность предварительной *разведывательной* информации, в отношении которой диск или флешка могут оказаться более грозным оружием, чем баллистическая ракета. Лазеры произвели революцию и здесь. Плотность записанной на носителе информации (бит/см²) определяет его компактность и массу. Луч лазера соответствующей энергии позволяет получать на диске метки (микроямки) глубиной и диаметром $\sim 10^{-7}$ м, что на два порядка меньше размера доменов магнитных носителей! Именно так возникли оптические дисковые накопители, содержащие миллиарды меток на одном диске.

Лазерное считывание информации с *CD*-диска (лазерные сканеры) основано на интерференции (см. параграф 8.3). Луч лазера, отраженный от поверхности диска, образует логическую единицу двоичной системы отсче-

та, а луч, отраженный от дна микроямки, имеет с ним разность фаз $\pi/2$. Возникающий в связи с этим интерференционный минимум образует логический нуль.

Высокая когерентность лазерного луча позволила реализовать и принципиально новые носители информации. Еще в 1948 г. английский физик Д. Габор (1900—1979, Нобелевская премия 1971 г.) выдвинул замечательную идею *голографии*, но осуществить ее удалось только в 1962—1963 гг. (американские физики Э. Лейт, Ю. Упатниекс и советский физик Ю. Н. Денисюк). Свет от лазера разделяют на два пучка. Один из них, отражаясь от зеркала, создает *опорную волну*, а второй отражается от предмета и создает *предметную волну*, когерентную опорной. Интерференция этих волн формирует на поверхности фотопластинки *голограмму* — набор пятен и штрихов, который внешне не имеет ничего общего с фотографией, но содержит гораздо более полную информацию, чем она, — не только об *амплитудах*, но и о *фазах* световой волны. При освещении голограммы такой же опорной волной, как при записи, возникает *объемное* изображение предмета, существенно отличающееся своей полнотой от плоского изображения на фотографии. Иллюзия предмета настолько велика, что, смещая положение глаз, можно видеть его в разных ракурсах.

Одна и та же пластинка обладает в этом отношении большой емкостью — на ней можно поместить сотни голограмм, записанных под разными углами.

Примеры практики

Голография развивается применительно к созданию носителей информации для ЭВМ с высокой плотностью и защищенных от подделок. Она позволяет быстро отсканировать любой предмет и получить его оцифрованное объемное изображение. Если полученную цифровую запись ввести в станок с программным управлением, то многие предметы можно воспроизвести в том же или ином материале. В последнее время это научились делать с помощью 3D-принтера, быстро изготавливая любой предмет из специальной пластмассы.

Голограммы позволяют анализировать особенности быстропротекающих процессов, например выстрелов. Голографические координаторы прицельно-навигационных систем (в том числе ночного видения) способны распознавать изображение и корректировать траекторию ракеты при наличии облаков, скрывающих местность, и других помех.

Монохроматичность лазерного луча, которая много выше, чем обычного радиосигнала (см. параграф 7.10), позволила совершить техническую революцию в телефонной, радио- и телевизионной связи. Монохроматичность сигнала можно оценить из соотношения неопределенностей (9.17) в виде $\Delta\nu\Delta t \sim (2\pi)^{-1}$, откуда при $\Delta t \sim 10^{-8}$ с $\Delta\nu \sim 10^7$ с⁻¹. Поэтому $\Delta\nu/\nu = 10^{-11}$ и меньше. В тактических целях по лазерному лучу передают сигналы предупреждения, бедствия, разведывательные и т.д. Поскольку фотон не имеет заряда, луч лазера, в отличие от радиолуча, характеризуется высокой помехозащищенностью.

Наконец, концентрация электромагнитной энергии в узком луче позволяет достигать весьма высокой ее плотности. При диаметре луча ~1 мм получены интенсивности излучения $\sim 10^9$ Вт/см², а при сверхкоротких импульсах ($\sim 10^{-15}$ с) — даже $\sim 10^{20}$ Вт/см². Это позволяет пробивать отверстия в самых твердых материалах, что используется в технологиях (сварка, сверление, резание, термообработка, маркировка). Энергия, необходимая для *боевого* лазерного луча, может вырабатываться двигателем корабля, самолета или танка.

Лазерное оружие характеризуют скрытность (отсутствие пламени, дыма, звука), высокая точность, мгновенность действия (скорость света) и возможность применения в пределах прямой видимости. Такие средства уже поступили на вооружение некоторых армий.

Нелетальное лазерное оружие (пистолеты, ружья и т.п.) вызывает ослепление и оказывает психологическое воздействие, снижая боеспособность личного состава (например, снайперов). Оно применяется и для выведения из строя чувствительных элементов систем противника, и в качестве *имитаторов* стрельбы и тренажеров — для этого требуется мощность всего $\sim 1\text{--}2$ мВт/см². Такое оружие включают, например, в систему контроля на тактических учениях, позволяющую объективно оценивать работу каждого стрелка и общие результаты стрельб.

Сканирующий по местности свет лазера может создать и световую завесу, препятствуя визуальному наблюдению и работе снайперов противника.

10.3. Квантовая теория молекул

Электрон может переходить с одного энергетического уровня на другой в пределах атома, а если ему сообщить энергию, достаточную для ионизации, то он может не только покинуть атом, но и перейти в другую квантовую систему. Покинутый им атом превращается при этом в положительный ион. Возможен и обратный процесс — присоединение избыточного электрона, в результате чего атом превращается в отрицательный ион.

Ионизация, например, электронным ударом, — это процесс вероятностный. Ниже энергетического порога ионизации E_i она невозможна, а при $E > E_i$, по мере увеличения энергии E электрона, вероятность ионизации растет, пока не достигает максимума. Далее она снижается из-за уменьшения времени взаимодействия между ионизирующим электроном и атомом. Обратный процесс называется **рекомбинацией**: положительный ион захватывает свободный электрон, возвращается в нейтральное состояние, а энергия, ранее затраченная на ионизацию, выделяется в том или ином виде.

Описанные процессы возникают и при взаимодействии атомов друг с другом. Если разрозненные атомы имеют большую энергию, чем связанные на некотором стационарном расстоянии x_2 (см. рис. 4.9), то они могут и объединиться в молекулу. Казалось бы, валентные электроны атомов должны препятствовать их сближению и объединению, но для атомов *разного рода* возможна **химическая связь**. Например, атом Cl может отобрать валентный электрон у атома Na, в результате они превращаются в отрицательный и положительный ионы. Тогда *электростатическая сила* уже не расталкивает, а связывает атомы **ионной связью**.

Отрыв электрона от одного из атомов требует энергии его ионизации, а при рекомбинации оторванного электрона с другим атомом выделяется энергия ионизации уже этого атома, которая первой чаще всего не равна. Поэтому энергетический баланс объединения возможен за счет включения в него также электростатической энергии, высвобождаемой при сближении ионов, и энергии их теплового движения. В любом случае выделяющаяся при объединении энергия не может быть меньше энергии ионизации первого атома. Если же она больше, то ее излишек преобразуется в энергию движения атомов, т.е. в теплоту. При диссоциации таких молекул ионы, возникшие при объединении, сохраняются.

Существуют и такие молекулы, которые образованы *одинаковыми атомами* (O_2 , H_2 и др.). Ионная связь здесь невозможна из-за симметрии (валентности атомов одинаковы), поэтому возникает так называемая **ковалентная связь**. При равновесном расстоянии между атомами (когда энергия системы минимальна) облака плотности вероятности нахождения в пространстве валентных электронов разных атомов образуют *область взаимного перекрытия*. Это свидетельствует об *обобществлении* электронов разных атомов. Для *одинаковых* атомов общее электронное облако симметрично относительно ядер, а для разных атомов несимметрично: один из них оказывается «более отрицательным», чем другой. Таким образом, разделение связей на ионную и ковалентную в какой-то степени условно.

В соответствии с принципом Паули электроны, находившиеся в разрозненных атомах в одинаковых состояниях, при их объединении обязаны разойтись по состояниям, т.е. уровни валентных электронов *расщепляются*. Новая система (молекула) приобретает и дополнительные степени свободы — *колебательные* и *вращательные*, — которые имеют свои энергетические уровни. Электронные энергетические «ступеньки» молекул наибольшие ($\sim 1-10$ эВ). Каждому электронному уровню сопутствуют более мелкие колебательные ($\sim 10^{-2}-10^{-1}$ эВ), а каждому колебательному уровню — еще более мелкие вращательные уровни ($\sim 10^{-5}-10^{-3}$ эВ). Усложненная структура энергетических уровней определяет дополнительные переходы между ними, что обогащает спектр излучения или поглощения молекул по сравнению с атомным. Здесь возможны переходы как внутри каждого класса уровней, так и комбинированные, например *электронно-колебательные* или *колебательно-вращательные*. Спектр, связанный с вращательными степенями свободы, лежит в микроволновой области, а с колебательными — в инфракрасной. Поэтому в отличие от *линейчатого* спектра атомов спектр молекул *полосатый*, причем в пределах полосы отдельные линии вычленивать сложно. Чем больше атомов в молекуле, тем на большее число подуровней расщепляются исходные энергетические уровни и тем ближе они друг к другу.

Спектры молекул (как и атомов) — важный инструмент исследования их структуры. Для земной жизни, например, весьма важны спектры излучения и поглощения атмосферных молекул кислорода, азота, озона, водорода и водяного пара. Они поглощают губительное коротковолновое излучение, но пропускают видимое и инфракрасное, способствующее существованию и развитию жизни. Поглощенная солнечная энергия превращается в тепловую, химическую, биологическую и т.д. Деятельность человека приводит к увеличению в атмосфере процентного содержания CO , CO_2 и т.д., что приводит к парниковому эффекту: загрязненная атмосфера не выпускает наружу длинноволновое излучение, что чревато потеплением климата, таянием ледников и экологическими бедствиями.

Защищая человека, атмосфера в то же время препятствует наземным наблюдениям космических объектов, для которых наиболее информативно коротковолновое излучение. В атмосфере есть лишь узкие «окна прозрачности» в оптическом, инфракрасном и радиодиапазонах. Поэтому все большее развитие получает внеатмосферная астрономия, реализуемая путем выведения телескопов на орбиту спутников Земли.

10.4. Квантовая теория электропроводности

Помимо двухатомных, существуют многоатомные молекулы, а также конденсированное состояние вещества (кристаллическое и жидкое), имеющие качественно новые свойства: отдельные атомы не могут быть пластичными, а молекулы — «жидкими». Например, белковая молекула проталкивается в жидкости, как через песок.

Среди разнообразных свойств твердого тела (механических, оптических и др.) особое место занимает его электропроводность, сыгравшая огромную роль в развитии цивилизации. Классическая модель электропроводности (см. параграф 5.7) столкнулась с противоречиями. Она, в частности, предполагает, что носитель тока — электрон — приобретает скорость дрейфа на длине свободного пробега $\lambda_{\text{ср}}$, которая определяется средним расстоянием между узлами кристаллической решетки. Это приводит к зависимости удельного сопротивления от температуры в виде $\rho \sim \sqrt{T}$, которая противоречит формуле (5.40), отражающей экспериментальные данные.

Для разрешения противоречия немецкий физик А. Зоммерфельд (1868—1951) также прибег к *квантовой теории*. Поскольку дебройлевская длина волны тепловых электронов много больше, чем расстояния между узлами решетки, волна их «не чувствует» и обтекает свободно (см. параграф 8.6). Более того, если бы металл везде имел одну и ту же правильную однородную структуру, то он оказался бы для этой волны вообще прозрачным — она проходила бы через него *беспрепятственно*, т.е. металл не имел бы электрического сопротивления! Возникает оно только из-за *дефектов структуры* — примесей, дислокаций, а также неоднородностей, связанных с *тепловыми колебаниями* решетки, которые нарушают ее «правильность». Здесь уместно вспомнить теорию рассеяния света на *флуктуациях плотности* беспримесных сред (см. параграф 8.6).

Если тепловые колебания твердого тела представить как совокупность стоячих волн (см. параграф 8.3), то на стороне тела размером l укладывается $n\lambda_1/2$ колебаний одной длины волны, $n\lambda_2/2$ колебаний другой и т.д. Они определяют как совокупность *фотонов* теплового излучения, так и звук, и потому названы *фононами* (от греч. *phone* — звук). В теле имеются кванты с энергиями $h\nu_1$, $h\nu_2$ и т.д. Фононы — это совокупность *квазичастиц*, которая определяет спектр тепловых колебаний тела. Сталкиваясь друг с другом и с неоднородностями кристалла, они ведут себя как особый *фононный газ*. Именно на фононах рассеиваются электроны проводимости, а их длина $\lambda_{\text{ср}}$ свободного пробега зависит от температуры потому, что изменяется спектр и число фононов.

Расчет, основанный на такой модели, совпал с формулой (5.40). Исключение составила область вблизи $T \sim 0$, в которой нидерландский физик Х. Камерлинг-Оннес (1853—1926, Нобелевская премия 1913 г.) в 1911 г. обнаружил у ртути при температуре $T_{\text{кр}} \approx 4$ К *скачкообразное падение сопротивления до нуля* (рис. 10.4). Далее ученый открыл это явление (при других температурах) у олова и свинца. Температура $T_{\text{кр}}$ названа *критической температурой*, а состояние проводника при $T < T_{\text{кр}}$ — *сверхпроводящим*. Если в таком проводнике возбудить ток, то он будет циркулировать в нем неограниченно долго (в одном из экспериментов ток в сверхпроводящем кольце не изменился за 2,5 года!).

Сверхпроводящее состояние исчезает либо при $T > T_{\text{кр}}$, либо под воздействием магнитного поля напряженностью $H > H_{\text{кр}}$. При $H < H_{\text{кр}}$ магнитное

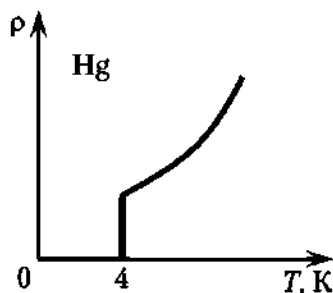


Рис. 10.4

поле вообще не проникает в сверхпроводник — он ведет себя как *идеальный диамагнетик*, который выталкивается из магнитного поля. Вследствие этого он может, например, зависать на магнитной подушке.

Кроме ртути, был обнаружен ряд других материалов со сверхпроводящими свойствами: Pb ($T_{кр} = 7,2$ К), Nb ($T_{кр} = 9,25$ К) и т.д. Существенный вклад в их объяснение внесли советские физики Л. Д. Ландау (Нобелевская премия 1962 г.) и В. Л. Гинзбург (Нобелевская премия 2003 г.). В конце концов стала доминировать модель американских физиков Дж. Бардина, Л. Купера и Дж. Шриффера (**теория БКШ**), получивших Нобелевскую премию в 1972 г. Согласно этой модели при взаимодействии с фононами электроны образуют так называемую **куперовскую пару**. Если один из них отдает энергию, то второй тут же ее поглощает — они как бы обмениваются фононами, и потому энергия пары не изменяется. Подобно этому взаимодействие зарядов обусловлено обменом фотонами. Энергия связи куперовской пары $\sim kT_{кр}$, поэтому если она поглощает фонон с энергией, большей либо равной $kT_{кр}$, то связь разрушается и сверхпроводник становится обычным проводником.

Сверхпроводник нашел ряд важных применений. Возможность длительного существования тока без поддерживающего напряжения придает ему свойство *памяти* (запоминается сигнал, возбудивший ток). При нулевом сопротивлении даже очень малые напряжения вызывают огромные плотности тока (до $\sim 10^6$ А/см²). Это позволяет в тысячи раз уменьшить сечение проводов, измерять сверхмалые напряжения (до $\sim 10^{-13}$ В), создавать магнитные поля с очень большой индукцией (ускорители заряженных частиц, термоядерные установки, турбогенераторы, двигатели, томографы для медицинской диагностики и т.д.).

Свойства сверхпроводников могли бы найти очень широкое применение, если бы не необходимость получения *весьма низких температур*, что и сложно, и дорого. Однако в 1986 г. Дж. Г. Беднорц и А. Мюллер синтезировали керамику Ва-Sr-Cu-O с $T_{кр} = 63$ К (Нобелевская премия 1987 г.), а через несколько месяцев на ее основе получена $T_{кр} = 138$ К. Эта температура замечательна тем, что вместо жидкого гелия теперь может быть использован гораздо более дешевый жидкий азот, и установки для получения сверхпроводимости могут по стоимости и надежности приблизиться к бытовому холодильнику.

Примеры практики

В Нью-Йорке в 2007 г. проложен первый силовой кабель, использующий сверхпроводимость, а поезда на магнитной подушке стали более эффективными: рекордные скорости (~ 600 км/ч), плавность хода, отсутствие шума и т.д.

10.5. Зонная теория

Итак, валентные электроны могут стать *общими для всех атомов*. При этом каждый атомный энергетический уровень расщепляется на подуровни, число которых определяется числом объединенных атомов. Поскольку кристалл твердого тела можно рассматривать как гигантскую молекулу, то число подуровней по порядку величины совпадает с плотностью атомов — $\sim 10^{22} - 10^{23} \text{ см}^{-3}$. Поскольку совокупность подуровней образует **энергетические зоны** шириной порядка нескольких электронвольт (рис. 10.5, *a*), то промежутками между ними $\sim 10^{-23} - 10^{-22} \text{ эВ}$ можно пренебречь, полагая, что они практически слиты. Это означает, что в пределах зоны энергия электрона может изменяться *непрерывно*. Что касается *распределения* электронов по энергиям, то в связи с принципом Паули оно не подчиняется распределению Максвелла (см. параграф 4.3). Например, при максвелловском распределении значение $T = 0$ свидетельствует, что энергии любых частиц ($\sim kT$) равны нулю, а в квантовой системе это означало бы, что электроны имеют одинаковые состояния, что невозможно. Поэтому электроны, так сказать, вытесняют друг друга, образуя новые состояния со все более высокими энергиями (как выразился М. Борн, «странно, что существует слово для обозначения того, чего, строго говоря, не существует... — ...покая»).

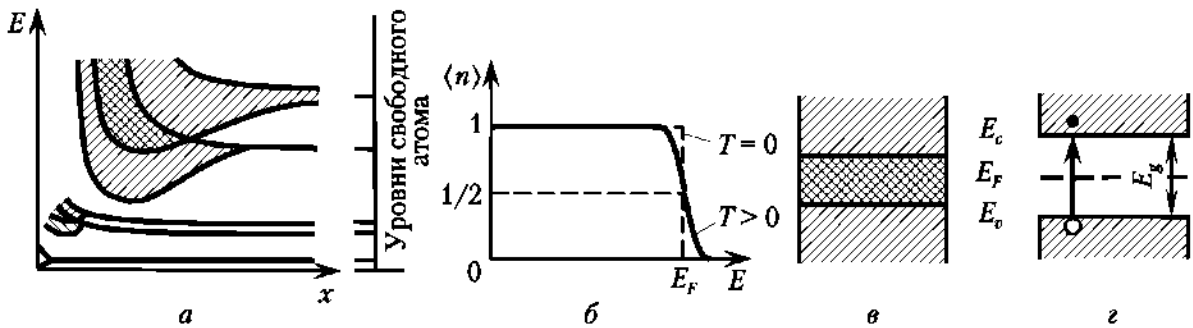


Рис. 10.5

Итальянский физик Э. Ферми (1901—1954, Нобелевская премия 1938 г.) и английский физик П. Дирак (1902—1984, Нобелевская премия 1933 г.) определили вероятность $f(E)$ того, что электрон имеет энергию E , т.е. долю таких электронов в твердом теле. **Распределение Ферми — Дирака** при $T \rightarrow 0$ имеет вид

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1}, \quad (10.2)$$

где E_F — энергетический уровень, названный **уровнем Ферми**. Для разных материалов $E_F \sim 5 - 10 \text{ эВ}$, в то время как тепловая энергия, например, при $T = 10^3 \text{ К}$, составляет $\sim 0,1 \text{ эВ}$.

При $T = 0$ и $E < E_F$ из формулы (10.2) получаем $f = 1$. Это означает, что все состояния вплоть до $E \rightarrow E_F$ заполнены электронами, что резко отличает квантовую статистику от максвелловской. Электроны занимают здесь весьма широкий спектр энергий вплоть до значений, которые классический газ имел бы при нескольких десятках тысяч кельвинов!

При $T = 0$ и $E > E_F$ из формулы (10.2) получаем $f = 0$, т.е. электронов в таких состояниях нет вообще. Таким образом, уровень Ферми определяет максимально возможную энергию электронов при $T = 0$.

ВОПРОС. Как изменится распределение Ферми – Дирака при $T > 0$?

ОТВЕТ. Дополнительная энергия возможна только при переходе электронов на уровни $E > E_F$. Соответственно, уровни $E < E_F$ обедняются электронами, т.е. энергетическая «ступенька» сглаживается, но это ее искажение происходит только в интервале тепловой энергии $\sim kT$ (рис. 10.5, б). При значении $E = E_F$ экспоненциальный член в формуле (10.2) становится равен 1 и, следовательно, $f = 1/2$ (см. рис. 10.5, б). Поскольку $kT \ll E_F$ лишь ничтожная доля электронов реагирует на нагревание металла, т.е. электроны практически *не вносят вклад в его теплоемкость*. Это внесло поправку и в теорию теплоемкости.

Чем выше температура, тем больше электронов переходит в область $E > E_F$ и сильнее проявляется их дефицит в области $E < E_F$. При $kT \rightarrow E_F$ прямоугольное распределение на рис. 10.5, б уже приближается к максвелловскому, однако такая ситуация требует температур $\sim 10^4$ К, когда металл в твердом состоянии уже не существует.

Электропроводность вещества определяется тем, может ли электрон осуществлять направленное движение под действием электрического поля, т.е. может ли приобрести *дополнительную энергию* $\sim 10^{-8} - 10^{-4}$ эВ, характерную для такого движения. Это определяется расщеплением энергетических уровней. Если более глубокие уровни атома расщеплению подвержены мало, то валентные электроны обобществляются в **валентную зону** (см. рис. 10.5, а). Для осуществления направленного движения *выше* того уровня, который занимает электрон, должен находиться уровень, расположенный близко и *не занятый другим электроном*, — иначе возникнет запрет, содержащийся в принципе Паули.

Если все вакансии в валентной зоне заняты, то носитель тока должен перейти в более высокую **зону проводимости**, образованную расщепленными уровнями возбуждения атома.

Кристаллы, у которых нижние энергетические зоны заполнены полностью, а верхние пусты, являются диэлектриками или полупроводниками.

Разница между ними определяется шириной **запрещенной зоны** E_g , т.е. шириной разрыва между «потолком» E_v энергии электрона в валентной зоне и «дном» E_c его энергии в зоне проводимости (рис. 10.5, г). При $E_g \geq 3$ эВ материал называют **диэлектриком** (слюда, фарфор, стекло и т.д.). Его сопротивление не бесконечно велико ($\rho = 10^8 - 10^{13}$ Ом·м), так как вследствие дефектов структуры ионы диэлектрика могут по кристаллу перемещаться. Кроме того, существует некоторая электропроводность поверхности. Электроны диэлектрика так же обобществлены, как и у проводника, и движутся так же *свободно*, но это движение может быть только *хаотичным*.

У большинства твердых веществ $E_g \leq 3$ эВ, поэтому, получив энергию извне, отдельные электроны валентной зоны могут «перепрыгнуть» через запрещенную зону в зону проводимости (см. рис. 10.5, г). Таких электронов мало, электропроводность подобных материалов мала ($\rho = 10^{-5} - 10^7$ Ом·м), и потому их называют **полупроводниками**.

При *частичном* заполнении валентной зоны внешнее электрическое поле изменяет распределение электронов по энергетическим уровням и вызывает электрический ток.

Кристаллы с частично заполненными энергетическими зонами являются проводниками (металлами).

Такой вариант реализуется у элементов первой группы таблицы Менделеева (Li, Na и др.). Например, у атома *натрия* *K*- и *L*-слои заполнены, а 11-й, валентный, электрон заполняет верхний уровень 3s только наполовину. Поэтому и валентная зона кристалла оказывается заполненной наполовину. Элемент второй группы Mg реализует другой случай: 3s-состояние атома и соответствующая зона заполнены, но зона частично перекрывается с вышележащей (рис. 10.5, в). Приведенные примеры характеризуют вещества, являющиеся хорошими **проводниками** ($\rho = 10^6 - 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$).

В ряде кристаллов частично заполненные зоны образуются в результате перекрытия верхней заполненной зоны с нижней пустой. Такие вещества (графит, висмут, сурьма) называются **полуметаллами**.

Характер названных зон определяется не только энергетическими уровнями атома, но и *структурой* материала, поэтому результаты комбинации одних и тех же атомов могут иметь разную электропроводность. Газ из атомов Ag — диэлектрик, а *кристалл* — хороший проводник. Углерод в состоянии алмаза является диэлектриком, а в состоянии графита — проводником (полуметаллом) и т.д.

10.6. Эмиссия электронов

Электроны проводника свободно перемещаются в пределах его границ, а при поглощении достаточной энергии могут и выходить наружу, преодолев стенку потенциальной ямы у поверхности тела (рис. 10.6). Это явление называется **эмиссией** электронов (в отдельном атоме аналогичное явление называется ионизацией).

При $T = 0$ энергия, необходимая для эмиссии, определяется разностью между уровнями $W = 0$ и уровнем Ферми E_F (рис. 10.6) и называется **работой выхода**. Источником энергии могут быть фотоны (см. параграф 9.3), вызывающие **фотоэмиссию** (фотоэффект).

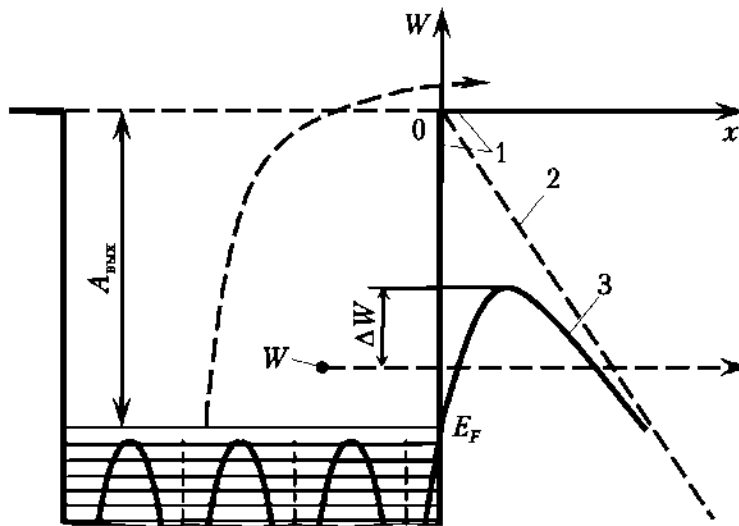


Рис. 10.6

Причиной термоэлектронной эмиссии является нагревание металла. При искажении функции распределения электронов (см. рис. 10.5, б) ее «хвост» может выйти за пределы среза потенциальной ямы, т.е. у некоторых электронов хватает энергии, чтобы покинуть металл. Обычно этим пользуются для поставки электронов в вакуум.

Простейший прибор, использующий термоэмиссию, — **электровакуумный диод** (рис. 10.7, а). Его катод К накаляется от источника ЭДС \mathcal{E}_n и испускает электроны, которые создают ток под действием электрического поля между анодом и катодом. Электровакуумный диод отличается от фотодиода в основном источником энергии, вызвавшей эмиссию электронов, поэтому их вольтамперные характеристики похожи. Чем больше напряжение U_a между анодом и катодом, тем большую часть электронов из их облака у катода вытягивает электрическое поле в единицу времени. Поэтому с ростом напряжения U_a ток I растет. При некоторых напряжениях поле вытягивает уже *все* электроны, покидающие катод, и дальнейший рост напряжения к росту тока не приводит — происходит насыщение.

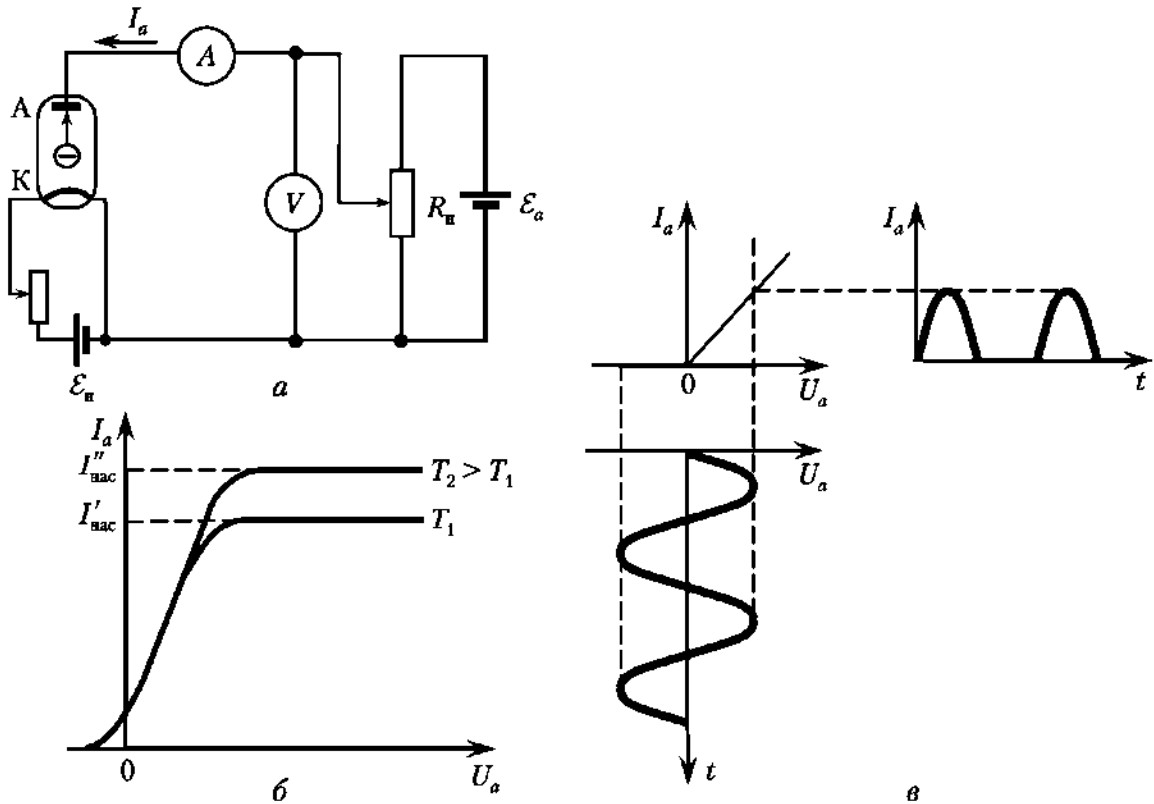


Рис. 10.7

ВОПРОС. Почему ток насыщения при T_2 больше, чем при T_1 (рис. 10.7, б)?
ОТВЕТ. При $T_2 > T_1$ больше электронов покидает катод в единицу времени.

При обратной полярности приложенного напряжения («минус» подключен к аноду, а «плюс» — к катоду) электроны не ускоряются, а тормозятся, поэтому электровакуумный диод способен пропускать ток только в одну сторону, т.е. он обладает *односторонней проводимостью*. Это позволяет применять его для *выпрямления тока* (рис. 10.7, в): во время действия положительной полуволны напряжения диод пропускает ток, а во время отрицательной — нет.

В 1907 г. американец Ли де Форест дополнил диод третьим электродом-сеткой, который позволил усиливать электрические сигналы. Такой **триод** стали затем дополнять и другими электродами, что позволило создавать разного рода *усилители, генераторы и преобразователи*. Это обусловило бурное развитие электротехники, радиотехники и электроники. Далее эстафету подхватили полупроводниковые приборы, вытеснившие электровакуумные лампы, но в ЭЛТ, рентгеновских трубках, электронных микроскопах и некоторых вакуумных лампах термоэмиссия по-прежнему актуальна.

Еще одним источником эмиссии электронов может быть бомбардировка поверхности материала различными частицами. **Вторичная электрон-электронная эмиссия** возникает в результате ударов внешних электронов, передающих часть своей энергии электронам вещества. Такую эмиссию используют, например, в **фотоэлектронном умножителе (ФЭУ)** (рис. 10.8, а). Его фотокатод 1 испускает электроны под действием света. Их ускоряют в направлении электрода (динода) 2, из которого они выбивают вторичные электроны, те ускоряются к диноду 3 и т.д. В результате первичный фототок умножается до такой степени, что ФЭУ способен регистрировать даже отдельные фотоны.

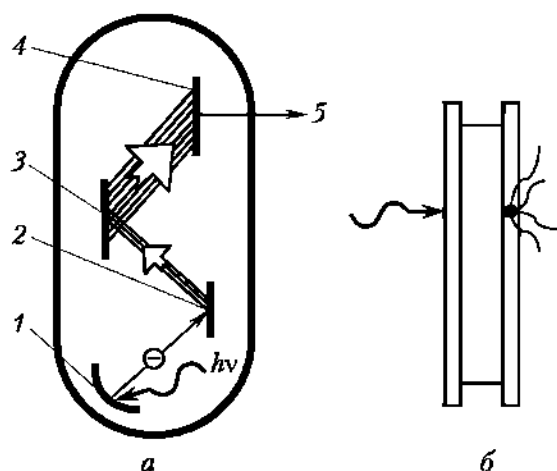


Рис. 10.8

Тот же принцип применили и в ЭОП (см. параграф 9.3) нового поколения. Он содержит сотни тысяч ФЭУ (по числу пикселей, формирующих изображения объектов), каждый из которых представляет собой металлизированный микроканал шириной ~ 10 мкм. По этому каналу так же зигзагообразно, как свет в оптоволокне и как электроны в ФЭУ, движутся электроны, размножаясь при каждом соударении со стенками канала вследствие вторичной эмиссии. Поскольку траектория электронов пренебрежимо мало отличается от прямолинейной (лишь в пределах ширины канала), то пакет таких каналов, расположенный между фотокатодом и экраном (рис. 10.8, б), избавляет от необходимости фокусировки фотоэлектронов (сравните с рис. 9.4). Каждый канал осуществляет не только размножение электронов, но и перенос их в требуемую точку, что обеспечивает четкость изображения.

При **вторичной ионно-электронной эмиссии** первичными частицами — носителями энергии являются ионы. В *газоразрядных приборах* они обеспечивают воспроизводство электронов из катода, которые затем размножаются путем ионизации молекул газа (см. параграф 5.9).

Существует и весьма экзотичный вид эмиссии, происхождение которого объясняется принципом неопределенности Гейзенберга. Если у поверхности металла есть электрическое поле, ускоряющее электроны, то на потенциальный уступ 1 накладывается прямая eEx (2 на рис. 10.6), и уступ превращается в барьер 3. Если полная энергия электрона равна W , т.е. на ΔW меньше высоты барьера, то по классическим представлениям «взять» его, т.е. выйти наружу, он не может. Однако по квантовым представлениям электрон — это еще и волна, которая не только *отражается* от оптически более плотной среды, но и *преломляется*. При этом наличие функции ψ *внутри барьера* означает конечную вероятность обнаружить там электрон. На «классический» взгляд, это невозможно, так как *полная* энергия электрона W , а ее составляющая — *потенциальная* энергия — равна в этой области $W + \Delta W$, т.е. часть оказывается больше целого! В то же время существует некоторая *неопределенность* ΔW энергии, которая зависит от времени Δt пребывания электрона внутри барьера: $\Delta W \Delta t \geq \hbar$. С уменьшением Δt неопределенность ΔW может достичь требуемой величины, и решение уравнения Шредингера дает конечные значения $|\psi|^2$ с *внешней стороны* барьера, т.е. существует вероятность того, что электрон выйдет наружу, не перепрыгивая через барьер! Она тем выше, чем меньше ΔW и Δt .

Эти выводы подтверждаются на практике наличием **туннельного, или подбарьерного, эффекта**. Он даже находит применение, обеспечивая эмиссию электронов из металла в полях напряженностью $\sim 10^6$ — 10^7 В/см. Поскольку такая эмиссия происходит без нагревания, облучения или бомбардировки частицами, ее называют **автоэлектронной**. Обычно она происходит со всевозможных острий, выступов и т.п., где напряженность поля резко возрастает. Она может привести и к электрическому пробою вакуумного промежутка.

В 1986 г. Нобелевской премией по физике отмечено основанное на туннельном эффекте изобретение сканирующего электронного микроскопа. Ее лауреаты — немецкие физики Э. Руска и Г. Бинниг и швейцарский физик Г. Рорер. В этом приборе тонкая игла сканирует вдоль поверхности на малом от нее расстоянии. Возникающий при этом туннельный ток несет информацию об энергетических состояниях электронов. Таким образом удается получить изображение поверхности с атомной точностью, что особенно важно в микроэлектронике.

Туннельный эффект ответствен за рекомбинацию при ионно-электронной эмиссии (см. выше), за электризацию трением, при которой электроны из атомов одного материала туннелируют к атомам другого. Он определяет и обобществление электронов при ковалентной связи, ведущей к расщеплению энергетических уровней (см. рис. 10.5, *a*).

10.7. Собственная проводимость полупроводников

В современных устройствах, помимо проводников, огромную роль играют полупроводники. В 1940-е гг. началась настоящая полупроводниковая революция, у истоков которой был советский академик А. Ф. Иоффе (1880—1960), создавший отечественную школу физики. Некоторые ее «выпускники» стали основателями собственных школ (А. П. Александров, Л. А. Арцимович, П. Л. Капица, И. В. Курчатов, Н. Н. Семёнов, Я. И. Френкель, Ю. Б. Харитон и другие).

Типичные полупроводники — это четырехвалентные германий и кремний с ковалентной связью атомов — по два электрона на связь (рис. 10.9). Принадлежа всему кристаллу, электроны переходят с одной связи на другую, а носителем тока становится тот электрон, который, получив энергию, покидает валентную связь (1 на рис. 10.9). После этого он может двигаться *свободно*, в том числе направленно — под действием электрического поля. **Энергию активации** E_g , требуемую для разрыва связи (см. рис. 10.5, *з*), могут сообщить ему тепловые колебания, внешнее излучение и т.д. Для Si $E_g = 1,12$ эВ, а для Ge $E_g = 0,77$ эВ. Если положить $E_v = 0$, то $E_c = E_g$ и тогда из формулы (10.2) следует

$$\frac{1}{\exp\left(\frac{E_g - E_F}{kT}\right) + 1} = 1 - \frac{1}{\exp\left(-\frac{E_F}{kT}\right) + 1}, \quad (10.3)$$

т.е. вероятность того, что электрон окажется на уровне $E_c = E_g$ (левая часть равенства), равна *убыли* вероятности его пребывания на уровне $E_v = 0$. После простых преобразований это выражение принимает вид

$$\exp\left(\frac{E_g - 2E_F}{kT}\right) = 1,$$

откуда $E_F = E_g/2$ — *уровень Ферми находится посередине запрещенной зоны*, т.е. энергии между E_v и E_F реализованы быть не могут, хотя и допускаются распределением (10.2).

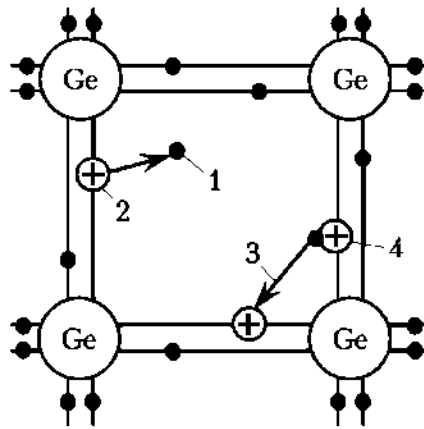


Рис. 10.9

После сообщения ему энергии активации электрон хаотично блуждает по кристаллу в зоне проводимости. Место, покинутое им в валентной связи, становится *дефицитом электрона* и называется **дыркой** (кружок 2 на рис. 10.9). Поскольку в нормальном состоянии на этом месте заряд $-e_0$, его изъятие эквивалентно сообщению положительного заряда $+e_0$. Если электрон связи 3, находящийся вблизи дырки, займет положение исчезнувшего, то дырка 4 образуется на новом месте. Затем и она может быть заполнена электроном и т.д., что эквивалентно *хаотичному* блужданию по кристаллу одной и той же дырки. Нечто подобное происходит при вырывании электрона из вакуума, оставляющего в вакууме дырку в виде античастицы — позитрона (см. параграф 12.6). Следует помнить, что дырка — это *квазичастица* (в действительности существуют и перемещаются только электроны),

однако удобнее следить за перемещением одной дырки, чем за множеством электронов, которые ее по очереди нейтрализуют.

Дырка может быть заполнена не только электроном связи, но и электроном проводимости, оказавшимся вблизи нее. Такая **рекомбинация** происходит с возвратом энергии активации E_g , которая может перейти к решетке, увеличив энергию ее тепловых колебаний, или выделиться в виде кванта излучения.

Под влиянием электрического поля появляется упорядоченное движение электронов и дырок, которое накладывается на их хаотичные перемещения. Электроны движутся в сторону возрастания потенциала, осуществляя **электронную проводимость** полупроводника, а дырки будут чаще заполняться теми электронами, которые находились со стороны более низких потенциалов. Это эквивалентно движению дырок в обратном направлении (в направлении поля). Дырки реализует **дырочную проводимость** полупроводника, представление о которой ввел советский физик-теоретик Я. И. Френкель (1894–1952). Таким образом, **собственная проводимость** беспримесного полупроводника определяется *двумя видами носителей тока*, подобно электролитам или ионизованным газам.

Как следует из самого механизма образования носителей тока, концентрации свободных электронов n_n и дырок n_p равны и определяются скоростями их генерации и рекомбинации. Генерация определяется левой частью формулы (10.3). При $E_g \gg kT$ единиц в знаменателе можно пренебречь. Учитывая, что $\exp[-E_g/(kT)] = \text{const}$, получим скорость *тепловой* генерации носителей:

$$\left. \frac{dn}{dt} \right|_{\text{ген}} = \text{const} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right).$$

С ростом n растет и скорость обратного процесса — рекомбинации:

$$\left. \frac{dn}{dt} \right|_{\text{рек}} = -\text{const} \cdot n_n n_p = -\text{const} \cdot n^2.$$

В равновесном состоянии эти скорости равны, поэтому

$$n^2 = \text{const} \cdot \exp[-E_g/(kT)], \quad n = \text{const} \cdot \exp[-E_g/(2kT)].$$

Поскольку проводимость полупроводника $\sigma \sim n$, то

$$\sigma = C_1 \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right), \quad R = \frac{1}{\sigma} = C_2 \exp\left(\frac{E_g}{2kT}\right). \quad (10.4)$$

где C_1, C_2 — постоянные. Как видим, в отличие от металлов, сопротивление полупроводников с ростом температуры уменьшается, что характеризуют температурным коэффициентом сопротивления:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}. \quad (10.5)$$

10.8. Примесная проводимость полупроводников

При $T = 300$ К, например, у кремния $n \approx 10^{10} \text{ см}^{-3}$, а у металлов $n \approx 10^{22} - 10^{23} \text{ см}^{-3}$. Чем же тогда интересна собственная проводимость полупроводника? Ничем — в отличие от проводимости полупроводников с *примесью*. Примесь — это посторонние атомы с *другой валентностью* в некото-

рых узлах кристалла. В решетке четырехвалентного кремния может оказаться, например, пятивалентный мышьяк (рис. 10.10, а). В этом случае четыре валентных электрона As вступают в химическую связь с атомами Si, а пятый оказывается «лишним». Он слабо связан с решеткой и *легко может перейти в зону проводимости*. Поскольку подобная примесь снабжает полупроводник электронами проводимости, она называется **донорной**. На языке зонной диаграммы, показанной на рис. 10.5, з, энергетический уровень E_d примеси, с которого происходит переход электрона, находится весьма близко к уровню E_c (рис. 10.10, а) — энергия ΔE активации (ионизации) примеси составляет всего 0,05 эВ (сравните с 1,1 эВ для валентного электрона). Поэтому даже при комнатной температуре практически все атомы примеси ионизированы, т.е. *концентрация свободных электронов того же порядка, что и атомов примеси*. В химически чистом веществе она составляет $\sim 10^{30}\%$.

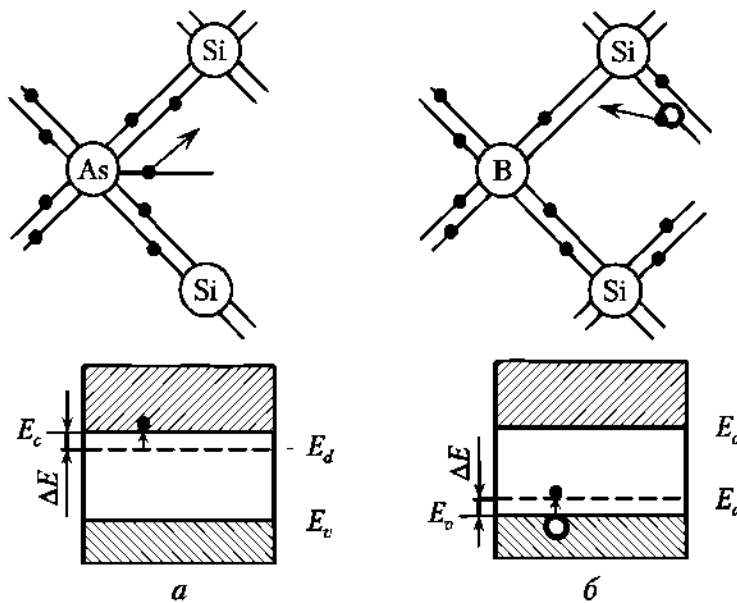


Рис. 10.10

Для кристалла это означает, что концентрация электронов проводимости (атомов примеси) $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Это приблизительно в 10^7 раз больше, чем концентрация собственных носителей Si при комнатной температуре, т.е. *даже в химически чистых кристаллах проводимость в основном определяется примесями*. Тем более это относится к природным полупроводникам, у которых процент примесей гораздо выше (в техническом Si — $\sim 1\%$). И хотя проводимость даже самого «грязного» полупроводника весьма далека от проводимости металлов, у него есть важная особенность. Отрыв пятого электрона As *не приводит к образованию дырки*: все четыре связи остаются на месте (см. рис. 10.10, а) и, следовательно, перемещение электрона из занятой связи на свободную невозможно. Вместо дырки образуется ион As^+ , прочно связанный с соседними узлами решетки и потому неспособный стать носителем тока. Отсюда следует, что полупроводник с донорной примесью обладает в основном *электронной проводимостью*, или **проводимостью n-типа** (по первой букве *negative* — отрицательный). Основными носителями в нем являются электроны, концентрация которых много больше, чем концентрация собственных носителей, а неосновными носителями — дырки.

Можно получить и обратное соотношение. Пусть в решетке Si какой-либо атом замещен атомом *трехвалентной* примеси, например бора (рис. 10.10, б).

У него в химической связи с Si могут участвовать лишь три его валентных электрона, а одна связь Si остается вакантной и потому сравнительно легко может быть заполнена другим *валентным* электроном Si. Необходимая для этого энергия — всего $-0,08$ эВ, что также много меньше, чем E_g . Это означает, что энергетический уровень E_a , на который приходит электрон, находится вблизи уровня E_v . Уровень E_a называют **акцепторным** (от лат. *acceptare* — принимать). Освободившаяся от электрона связь есть дырка, которая может перемещаться в валентной зоне в качестве носителя тока. При этом в отличие от чистого полупроводника ее образование *не сопровождается появлением свободного электрона*. Вместо него возникает отрицательный ион бора, прочно связанный с соседними атомами Si и поэтому неспособный быть носителем тока. Здесь также уже при комнатных температурах в проводимости участвуют все атомы примеси. Основными носителями такого полупроводника являются дырки, а неосновными — электроны, т.е. он обладает *дырочной проводимостью*, или **проводимостью p -типа** (по первой букве *positive* — положительный).

В природном полупроводнике имеются десятки разных примесей, что приводит к *смешанному характеру проводимости*. Если же нужен полупроводник n - или p -типа, то добиваются высокой степени очистки базового полупроводника *от всех примесей*, а затем вводят в него заданную легирующую примесь в требуемой концентрации. Поэтому развитие полупроводниковой электроники потребовало создания весьма трудоемких технологий, обеспечивающих степень очистки материалов до одного атома примеси на 10^{10} собственных атомов! Однако эти сложные технологии оказались оправданными благодаря широким возможностям полупроводников, связанным с различием типов проводимости.

10.9. Электронно-дырочный переход

ВОПРОС. К чему приведет контакт полупроводников p - и n -типа?

ОТВЕТ. Он аналогичен соединению сосудов с разными газами. Возникает *диффузия* дырок в полупроводник n -типа и электронов — в обратном направлении. Соответственно, в n -области остаются положительные, а в p -области — отрицательные неподвижные ионы доноров и акцепторов, т.е. в зоне контакта возникает **двойной электрический слой** шириной $d \approx 10^{-3} \div 10^{-4}$ мм, который называют **электронно-дырочным переходом**, или чаще **p - n -переходом** (рис. 10.11, *а*). Вследствие рекомбинации основных носителей их концентрация в этом слое уменьшается в 10^6 – 10^9 раз, поэтому его называют также **обедненным слоем**.

ВОПРОС. Как направлено электрическое поле, возникшее в переходе?

ОТВЕТ. Оно препятствует продолжению диффузии основных носителей, поэтому в конце концов устанавливается равновесие. Величина возникшей **контактной разности потенциалов** определяется обобществлением уровней Ферми, который у полупроводника n -типа находится между уровнями E_d и E_c , а у полупроводника p -типа — между E_v и E_a (рис. 10.11, *б*). Подчеркнем, что возникший энергетический барьер $\sim E_g$ препятствует движению только *основных* носителей, а для неосновных это поле является ускоряющим (нечто похожее возникает при контакте разнородных металлов: образуется контактная разность потенциалов, зависящая от температуры; такие **термопары** используют для ее измерения).

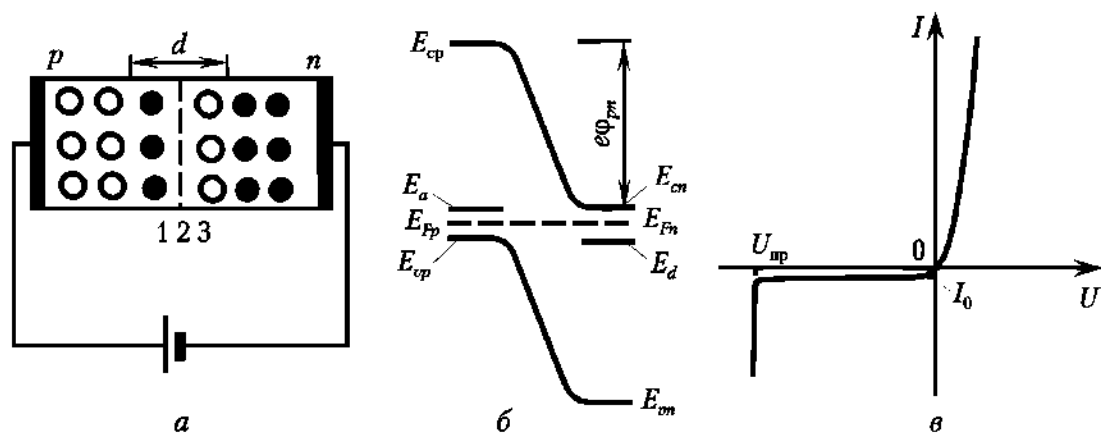


Рис. 10.11

Если подключить источник напряжения «плюсом» к p -области, а «минусом» — к n -области (см. рис. 10.11, a), то напряжение такой полярности называется **прямым**.

ВОПРОС. К чему оно приводит?

ОТВЕТ. Оно уменьшает высоту потенциального барьера, поэтому число основных носителей, способных его преодолеть, быстро возрастает, и ток через p - n -переход увеличивается (рис. 10.11, b). Это характерно для любых частиц, находящихся в потенциальном поле. Чтобы представить себе этот процесс количественно, вспомним распределение Больцмана и Ферми — Дирака.

При обратной полярности источника потенциальный барьер для основных носителей возрастает. Напряжение такой полярности называют **обратным**. В этом случае через p - n -переход течет лишь весьма слабый ток I_0 неосновных носителей (их концентрация мала). Упрощенная вольтамперная характеристика p - n -перехода имеет вид

$$I = I_0(e^{eU/(kT)} - 1). \quad (10.6)$$

Поскольку изменение знака приложенного напряжения приводит к изменению тока в 10^5 – 10^6 раз (см. рис. 10.11, b), p - n -переход представляет собой **полупроводниковый диод**, обладающий, как и электровакуумный диод, **односторонней проводимостью**. Его можно использовать для **выпрямления** электрического напряжения (тока), что широко применяют в различных электронных устройствах, силовой технике и т.д. Однако это далеко не единственное его применение.

Примеры практики

При обратных напряжениях p - n -переход практически эквивалентен разрывающему цепь **конденсатору**, который в данном случае обладает важной особенностью: с изменением обратного напряжения ширина обедненного слоя, т.е. расстояние между обкладками конденсатора, также изменяется. Такой **конденсатор переменной емкости** называют **варикапом** (от англ. *variable* — переменный и *capacitor* — конденсатор). Быстродействие и возможность дистанционного управления емкостью варикапов в пределах 10^{-2} – 10^2 пФ — это те его преимущества, которые используют в контурах радиоприемных устройств, усилителях и т.д.

Повышение обратного напряжения на p - n -переходе имеет предел. При достижении некоторого значения $U_{пр}$ неосновные носители-электроны

приобретают энергию, достаточную для ионизации атомов. При этом носители лавинообразно размножаются, и ток быстро нарастает без дальнейшего увеличения напряжения — вольтамперная характеристика на этом участке практически параллельна оси I (см. рис. 10.11, θ). Такое постоянство напряжения в широком диапазоне токов — основа работы полупроводниковых стабилизаторов, применяемых для защиты от перенапряжений и поддержания параметров всевозможных электронных схем.

Зависимость характеристик полупроводников от *внешних факторов* также удалось превратить из недостатка в достоинство. В результате *деформации* кристалла его структура изменяется. Это влияет на расщепление уровней, границы зон, энергию активации E_g и ионизации примесей, а также на совокупность фононов и, следовательно, на подвижность носителей. Эффект изменения проводимости настолько велик, что его используют для измерения ничтожных относительных деформаций (до $\sim 10^{-10}$). Такие **тензодатчики** широко применяют в науке и технике.

Что касается изменений температуры, то на проводимость, связанную с основными носителями, они не влияют, поскольку примеси и так ионизованы, однако *собственная* проводимость полупроводника изменяется в соответствии с формулами (10.4), (10.5). Тем самым реализуется **терморезистор (термистор)**, сопротивление которого зависит от температуры и потому может служить ее датчиком. Например, при изменении температуры охлаждающей жидкости в автомобилях сопротивление такого датчика изменяется примерно в 30 раз. В качестве датчика терморезистор часто используют как элемент системы автоматического регулирования.

Аналогичный результат можно получить, и путем *освещения* p - n -перехода. Если энергии квантов достаточно для отрыва электронов от связей, то под действием света возникает генерация неосновных носителей, влияющая на ток в цепи. В этом случае вольтамперная характеристика (10.6) принимает вид

$$I = I_0(e^{eU/(kT)} - 1) - I_\phi, \quad (10.7)$$

где I_ϕ — фототок неосновных носителей, текущий в направлении, обратном току основных носителей. Таким образом, p - n -переход может быть применен как **фотодиод**, способный служить датчиком интенсивности излучения (контроль запыленности или задымленности, хода химических реакций в прозрачных растворах и т.д.). Он позволяет осуществлять и *оптическое управление током* (уровнемеры, турникеты, счетчики деталей, защитные устройства станков, охранная сигнализация и т.д.). Некоторые из носителей, например InSb, реагируют на ИК-излучение и потому используются в приборах ночного видения. Поскольку фотодиоды обладают малым временем срабатывания ($\sim 10^{-11}$ с), их широко применяют в системах передачи уплотненной информации (волоконно-оптическая связь, ЭВМ и т.д.).

Полупроводниковый диод может работать и как *преобразователь теплоты и света в электрический ток или ЭДС*. При этом возникают новые неосновные носители, разделяемые полем p - n -перехода: электроны из p -области устремляются в n -область, а дырки из n -области — в p -область. В случае нагревания возникает **термо-ЭДС** (E_T), а в случае освещения — **фото-ЭДС** (E_ϕ). Для повышения ЭДС и мощности отдельные элементы соединяют

в *батарею*. Во время Великой Отечественной войны под руководством А. Ф. Иоффе был разработан ряд генераторов термо-ЭДС, подогреваемых керосиновой лампой или кипящей водой. Они обеспечивали питание радиоаппаратуры и другой техники в партизанских отрядах. В настоящее время существуют термобатареи мощностью в десятки и даже сотни кВт.

Большое распространение получили **солнечные батареи** на основе Si, GaAs и т.д., питающие бортовые системы космических аппаратов, автомобилей и всевозможные стационарные устройства, включая жилые дома (особенно в южных районах). Они отличаются высоким КПД (~60%), экологически чисты и позволяют сохранять ресурсы нефти и газа, болсс полезныс, например, в химической промышленности.

ВОПРОС. Как оценить ЭДС, вырабатываемую фотоэлементом солнечной батареи?

ОТВЕТ. По уравнению (10.7). При разомкнутых выводах $I = 0$, поэтому

$$U = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{I_{\Phi}}{I_0} \right), \quad (10.8)$$

где I_0 — ток в отсутствие освещения.

Полупроводник может не только *реагировать* на внешнее излучение, но и быть его *источником*. У GaAs, например, длина волны света, излучаемого при рекомбинации электронов и дырок, составляет 0,89 мкм (инфракрасная область). Добавляя фосфор, можно получить красное свечение, а с помощью других соединений — зеленый, синий и другие цвета свечения. Такие светодиоды широко применяют в качестве сигнальных и знаковых индикаторов, в многоцветных индикаторных панелях, осветительных приборах и т.д.

С помощью накачки током, текущим через *p-n-переход*, можно получить также инверсную населенность и **лазерное излучение** с самыми разными длинами волн (0,3—30 мкм). В лазерном принтере, например, применяют лазерный диод, инфракрасное излучение которого сканирует по заряженному диэлектрическому барабану, в освещаемых точках заряд уменьшается, а к остальным притягиваются наэлектризованные частицы тонера.

Примеры практики

Полупроводниковые приборы позволили устранить и «родовые» недостатки ПНВ, основанных на ЭОП: необходимость вакуума, относительно высокие напряжения, размеры и массы рабочих элементов. Ядром ПНВ, основанного на любом физическом принципе, является **матрица**, дробящая изображение объекта на десятки и сотни тысяч пикселей. В ЭОП такую матрицу образуют микроскопические зерна фотокатода. Ее, однако, можно реализовать и в виде фотодиодной матрицы. В каждом ее фотодиоде вследствие внутреннего фотоэффекта генерируется заряд неосновных носителей, пропорциональный интенсивности попавшего на него света. Фотодиод выполняет функции свособразного пикселя, а их совокупность формирует зарядовый аналог изображения, который преобразуют в реальное изображение на экране. Недостаток такой матрицы состоит в необходимости автономного съема сигналов с огромного числа пикселей и их последующего преобразования.

В 2009 г. американцы У. Бойл и Д. Смит удостоены Нобелевской премии по физике за создание прибора с зарядовой связью (ПЗС). Если в каждом ПЗС-пикселе, как и в фотодиоде, генерируется заряд, пропорциональный освещенности ячейки, то съем заряда осуществляется не индивидуально (с каждого пикселя), а с участием других пикселей. Зарядовая связь между ними позволяет производить операцию, подобную передаче кирпичей по цепочке строителей. При этом в отличие от кирпичей каждый зарядовый пакет несет информацию об освещенности конкретного пикселя.

ПЗС-ячейка представляет собой МОП-структуру (металл — оксид — полупроводник), содержащую прозрачный электрод-затвор, отделенный от кремниевого полупроводника, например, *p*-типа, слоем прозрачного диэлектрика (диоксид кремния). На рис. 10.12, *a* показан фрагмент ПЗС-матрицы.

При положительном потенциале второго затвора положительно заряженные основные носители-дырки от него отталкиваются. Соответственно, под затвором возникает обедненный слой, а на его границах — потенциальные барьеры, отделяющие эту область от соседних. Освещение генерирует в ней неосновные носители-фотоэлектроны, которые притягиваются к затвору в пределах потенциальной ямы и в ней хранятся (см. рис. 10.12, *a*).

Если теперь на третий затвор подать потенциал больший, чем на втором, то под третьим затвором сформируется более глубокая потенциальная яма,

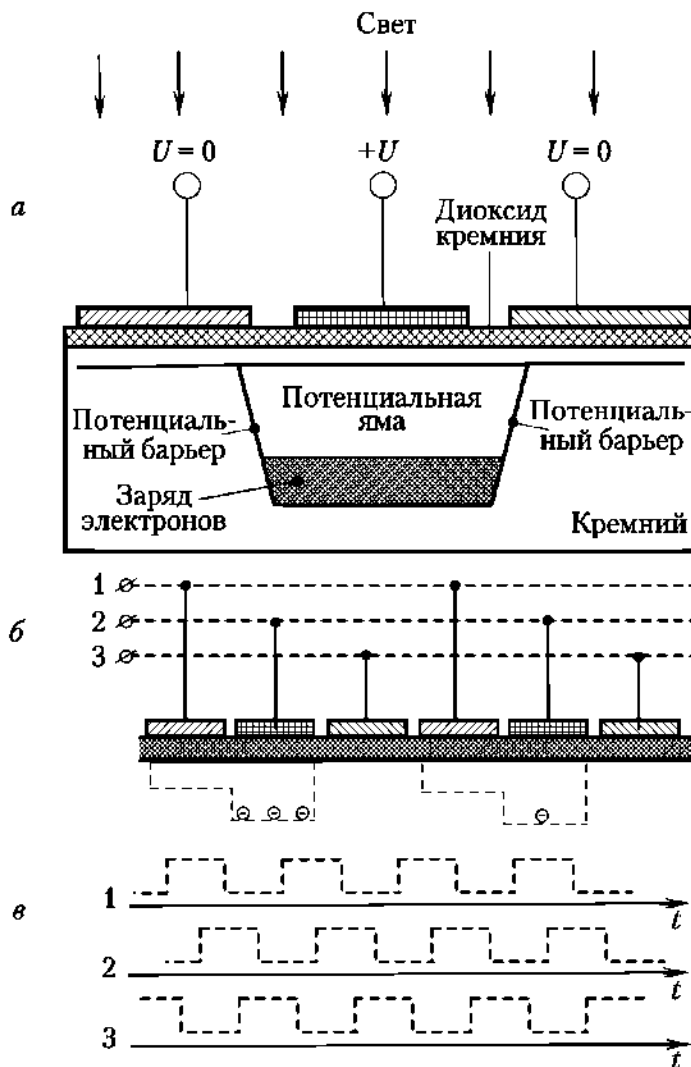


Рис. 10.12

примыкающая к предыдущей. Поскольку эти ямы объединены, то в соответствии с принципом минимума энергии электронный заряд перетекает в более глубокую яму (рис. 10.12, б). То же самое произойдет в случае, если на третий затвор подать такой же потенциал, какой был на первом, а первый в это время уменьшать. Таким способом можно с помощью сдвинутых во времени управляющих импульсов, подаваемых на цепочку затворов (рис. 10.12, в), направленно перемещать локализованный электронный заряд, например, слева направо, как показано на рис. 10.12, б.

Для того чтобы не возникло движения заряда в обратном направлении, на следующем справа затворе должен быть запирающий нулевой потенциал.

При проецировании изображения на всю линейку пикселей в каждом из них возникает индивидуальный заряд, соответствующий его освещенности. Поскольку подача потенциалов на затворы синхронизирована (см. рис. 10.12, б), сдвиг зарядов на одну ячейку вправо происходит по всей цепочке сразу. Крайняя правая ячейка отдает заряд выходному устройству, предпоследняя отдает заряд последней и т.д. Затем происходит следующий сдвиг, пока заряд первой ячейки линейки не достигнет выхода. В результате на выходе строки формируется последовательность импульсов, созданная зарядами, несущими информацию об освещенности каждого пикселя. Такая линейка может служить датчиком одномерного изображения (считыватель штрихкодов). Съём информации осуществляется здесь уже не с каждого элемента, а со всей линейки, а перемещение зарядов по ней управляется с помощью всего лишь трех шин, независимо от числа пикселей в строке.

Если требуется двумерное изображение, то линейку механически перемещают в перпендикулярном к ней направлении (сканер). При необходимости видеть весь объект *сразу* (а именно это требуется в приборах наблюдения) механическое перемещение уже неприемлемо: оно слишком инерционно и ненадежно. Потому используют совокупность параллельных линеек, образующую ПЗС-матрицу. После вышеописанной процедуры считывания первой (нижней) строки (горизонтальный перенос) используется ее зарядовая связь со второй (вышерасположенной) строкой. Заряды ячеек второй строки синхронно перетескают в нижерасположенные ячейки первой строки (вертикальный перенос), вторая строка синхронно заполняется зарядами более высокой третьей и т.д., т.е. двумерный массив зарядов матрицы одновременно сдвигается вниз на одну строку. Это происходит до тех пор, пока не будет считана последняя (верхняя) строка матрицы, т.е. весь кадр. Затем начинается считывание следующего кадра и т.д. В какой-то мере это напоминает строчную и кадровую развертку телевидения.

Выходные сигналы ПЗС-матрицы могут быть преобразованы в цифровую форму для компьютерной обработки информации, ее визуализации с помощью ЖК-дисплеев и т.д.

ПЗС-матрицы стали основой различных цифровых средств отображения информации (сканеры, фото- и видеокамеры и др.). В современной военной оптике ПНВ, основанные на ПЗС-матрицах, — очки, бинокли, прицелы и т.д. — позволяют видеть и фотографировать в темноте, создавать охранные системы, находить раненых под завалами, обнаруживать и устанавливать вид военно-технических устройств и т.п.

10.10. Транзистор

Если при *обратном* напряжении в p - n -переход «впрыскивать» носители, для которых его поле является *ускоряющим*, то возникнет ток, который можно регулировать интенсивностью «впрыскивания». Этот принцип реализован в **транзисторе**, изобретенном в 1948 г. американскими физиками Дж. Бардиным, У. Браттейном и У. Шокли (Нобелевская премия 1956 г.). Простейший вариант транзистора представляет собой совокупность следующих друг за другом p - n -переходов с полупроводниками одинакового типа снаружи и противоположного посередине, например, p - n - p или n - p - n (рис. 10.13, а).

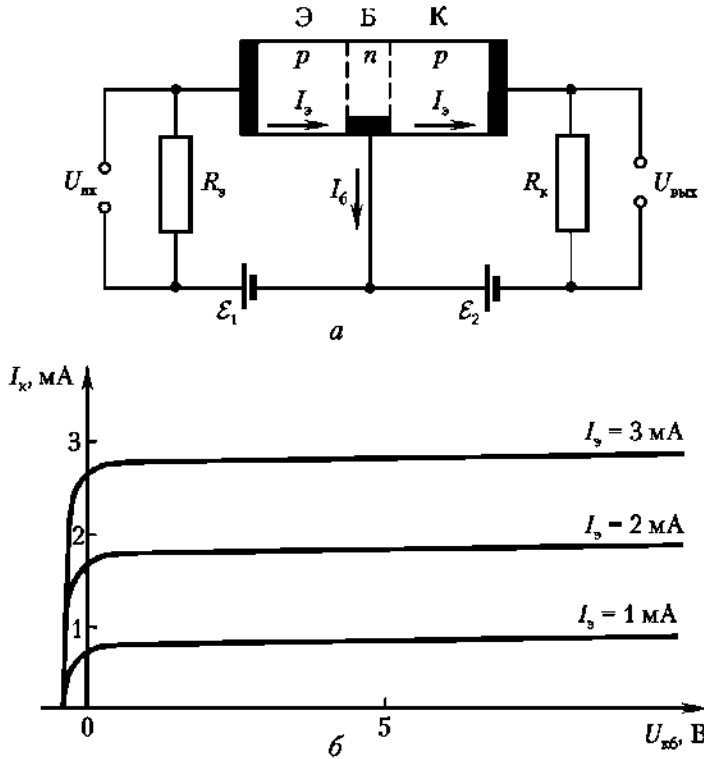


Рис. 10.13

Средний полупроводник называют **базой** (Б), а крайние — **эмиттером** (Э) и **коллектором** (К). Эмиттер — источник носителей, коллектор — их приемник, а p - n -переходы служат для управления током. Пусть, например, в системе p - n - p второй переход включен в обратном направлении (см. рис. 10.13, а). Тогда основные носители базы — электроны через него не проходят, т.е. он имеет *большое сопротивление*. Поставщиком дырок служит первый переход. Если его приоткрыть в прямом направлении, то, пройдя через базу (ее делают тонкой), они попадают в поле второго перехода. Регулирование напряжения на первом переходе осуществляется источником \mathcal{E}_1 (постоянное смещение) и напряжением $U_{вх}$ входного сигнала.

На рис. 10.13, б показаны характеристики коллекторного перехода при разных токах эмиттера. При увеличении тока эмиттера пропорционально ему возрастает ток коллектора $\Delta I_k = \alpha \Delta I_e$, где α — коэффициент передачи тока эмиттера. Поскольку входное сопротивление $R_{вб} = \Delta U_{вб} / \Delta I_e$ мало (~ 10 – 30 Ом), а выходное велико (~ 10 кОм), отношение изменения выходного напряжения $\Delta U_{кб}$ к вызвавшему его изменению эмиттерного напряжения $\Delta U_{эб}$ оказывается большим. Его называют коэффициентом усиления по напряжению.

Помимо *биполярных* транзисторов, работающих на носителях *двух* типов, в 1960—1962 гг. появились *униполярные*, или *полевые*, транзисторы, использующие один *p-n*-переход и работающие на носителях одного типа. Вариант устройства полевого транзистора показан на рис. 10.14. Это плоскостная (планарная) конструкция, содержащая металлические электроды (исток, сток и затвор), отделенные диэлектриком от полупроводника (МДП-структура). В полупроводнике, например, *n*-типа, основные носители движутся от *истока* к *стоку* через *канал*, граничащий с полупроводником *p*-типа. На *p-n*-переход между полупроводниками разных типов через *затвор* подается обратное напряжение, и по нему течет ток неосновных носителей.

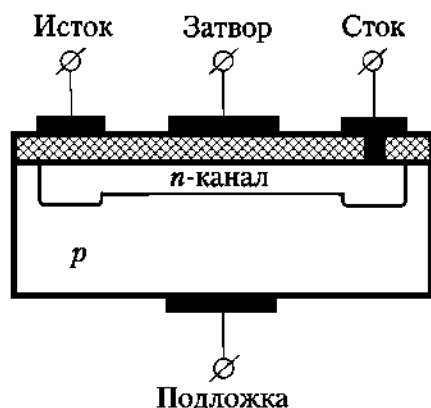


Рис. 10.14

Поступающее на затвор напряжение входного сигнала создает поперечное поле, изменяющее толщину обедненной области *p-n*-перехода и, соответственно, поперечное сечение *n*-канала и ток в управляемой цепи. Поскольку обратные токи *p-n*-перехода весьма малы, мощность источника сигнала может быть ничтожной. Это особенно важно в таких устройствах, как пульты дистанционного управления, кварцевые часы, схемы, работающие в ждущем режиме, и т.д.

Как и электровакуумные приборы, транзисторы служат для усиления и генерации электрических сигналов. Вызванную ими информационно-техническую революцию определили малые габариты, масса, стоимость, напряжение питания и энергопотребление, а также механическая прочность, долговечность и мгновенная готовность к функционированию, что особенно важно для ЭВМ и различных бортовых систем самолетов, ракет и космических аппаратов.

Большинство полупроводниковых компонентов делают на основе кремния. В 1950 г. У. Шокли создал *плоскостной транзистор*, на основе которого в 1958 г. американцы Дж. С. Килби (1923—2005, Нобелевская премия 2000 г.) и основатель «Силиконовой долины» Р. Нойс (1927—1980) предложили *планарную технологию*. Она позволила перейти от отдельных полупроводниковых приборов к *интегральным микросхемам*, содержащим на общей пластине огромное количество различных элементов. Это позволило создать **микропроцессоры**, значительно повысило надежность эксплуатации техники и опрокинуло все прогнозы.

В 1940 г. президент *IBM*, например, полагал, что весь мировой рынок потребует не более пяти компьютеров. Первый компьютер ЭНИАК весил 30 т, содержал ~17 000 электронных ламп и занимал площадь 100 м². В 1949 г.

фирма *IBM* высказала надежду, что в будущем компьютеры будут весить не более 1,5 т, однако уже первый микропроцессор (1971 г.) оказался не только мощнее, чем ЭНИАК, но и имел размеры $5,5 \times 5,5$ мм.

В 1951 г. У. Шокли предложил идею **гетероструктур**, содержащих несколько слоев полупроводников с разной шириной запрещенной зоны, за разработку которых Ж. И. Алферов (Россия) и Г. Кремер (Германия) в 2000 г. удостоены Нобелевской премии. Такие полупроводники широко применяют в высокочастотной и оптоэлектронике (светодиоды, линии спутниковой связи, лазеры, проигрыватели на компакт-дисках, волоконно-оптические кабели, сканеры, мобильные телефоны и т.д.). В настоящее время существуют микропроцессоры, содержащие $\sim 10^7$ транзисторов и осуществляющие $\sim 10^9$ операций в секунду. Это привело к распространению микропроцессоров во всех областях человеческой деятельности и жизнеобеспечения.

На земле, в воде, воздухе и космосе компьютер собирает данные от множества датчиков и оптимизирует работу двигателя, систем жизнеобеспечения, прокладывает курсы, а в военном деле решает множество специфических задач, в том числе с использованием роботов. Весьма важна и цифровая обработка визуальной информации, полученной на основе ПЗС-матриц, в том числе в ИК-диапазоне. Микросхемы существенно изменили методы и средства обработки сигналов, в том числе оптических. Если раньше эти функции выполнял лишь созданный природой зрительный отдел коры головного мозга, связанный с глазом «многожильным кабелем» зрительного нерва, то теперь этот тандем во многом вытеснен многофункциональными электронными системами с цифровыми технологиями обработки информации. Их необходимость связана с ограниченными возможностями человека (см. параграф 9.1).

Цифровые технологии открывают широкие возможности регулирования изображения (яркость, контрастность и т.д.) и совмещения его с другой визуальной информацией, необходимой командиру или бойцу. «Зоркий глаз» прежнего воина вытесняется разнообразными оптико-электронными приборами (ОЭП), что превращает солдата XXI в. в гораздо более эффективную боевую единицу, чем 100 и даже 20 лет назад. Его оптико-информационная экипировка повышает быстрдействие, качество и точность наблюдения, разведки, прицеливания и управления огнем.

В оптический прибор могут быть встроены дальномер, гигрометр, анемометр и даже баллистический калькулятор, который задает угол прицеливания и корректирует положение оружия. У современного бойца появился многофункциональный шлем, не только защищающий голову, в том числе от опасного светового излучения (ядерный взрыв, лазер), но и выполняющий роль экрана для отображения разнообразной информации. Последняя даже может избавить стрелка от установленного веками совмещения линии прицеливания с глазом.

Тем или иным ОЭП или их комплексом снабжена практически любая современная военная техника, причем характеристики ОЭП привязаны к тактико-техническим характеристикам оружия или индивидуальным задачам и зачастую являются определяющими для хода и результата боевых действий.

В сущности, современный танк или баллистическая ракета стали искусственными организмами, а их ОЭП в этом смысле наследуют зрительному каналу живого существа. Даже некоторые современные мины, устанавливаемые за обочиной дороги, имеют инфракрасный датчик, реагирующий на тепловое излучение моторного отсека машины: он замыкает взрыватель, и мина выбрасывает кумулятивное ядро, поражающее броню. Подобную мицу не может обезвредить сапер — ее датчики срабатывают под воздействием тепла его тела.

Электронные чипы уже вживляют в животных и человека для управления биологическими и физиологическими функциями, а повсеместное использование компьютеров, мобильной и интернет-связи изменило сам стиль мышления и поведения человека. Еще бóльшие перспективы в отношении миниатюризации и информационной мощности систем открываются в связи с проектами создания квантового компьютера. В нем, в частности, предполагается использовать две противоположные ориентации спина электрона в качестве логических нуля и единицы.

По-видимому, мы на пороге синтеза искусственных и естественных клеток и создания искусственного интеллекта.

Резюме

Подводя итоги настоящей главы, отметим ее основные положения.

На уровне атомов физическая картина мира определяется их взаимодействием, в том числе путем излучения и поглощения фотонов. Среди механизмов излучения существует индуцированное, лежащее в основе лазера, луч которого обладает острой направленностью, монохроматичностью и когерентностью.

Взаимодействие атомов определяет образование молекул и конденсированного состояния вещества, обладающего качественно новыми свойствами по сравнению с атомами. Одно из них — электропроводность, в том числе сверхпроводимость, может быть адекватно описано только квантовой теорией. На основе зонной модели она объясняет существование проводников, диэлектриков, полупроводников, а также разные виды эмиссии электронов.

Лазерный луч, а также собственная и примесная проводимости полупроводников определили техническую революцию в технике и технологии, в том числе относящихся к ВВТ.

Вопросы для самоконтроля

1. Что произойдет с линейчатым спектром раскаленного газа после прохождения его излучения сквозь такой же газ, но холодный? Что произойдет с излучением другого источника, имеющего сплошной спектр?
2. Свет газоразрядного лазера со стеклянной оболочкой виден сбоку. Не противоречит ли это высокой направленности лазерного луча?
3. В чем разница воздействия лазерного луча на поглощающую и отражающую поверхности?
4. Почему при средних температурах молярная теплоемкость разных металлов примерно одинакова, несмотря на большое различие концентрации свободных электронов?

5. По классической теории подвижность носителей тока с ростом температуры уменьшается. Тогда почему сопротивление металлов возрастает, а полупроводников уменьшается?

6. Сопротивление какого полупроводника — с примесью или без — сильнее зависит от температуры? Зависит ли ответ от ее значения?

7. Темновой ток (в отсутствие освещения) полупроводникового фоторезистора ограничивает нижний порог регистрации светового потока. Как уменьшить этот порог?

8. Монохроматичность лазерного луча не допускает его частотную модуляцию. Как тогда передавать информацию по лазерному лучу?

9. Как с помощью формулы (10.4) графически найти энергию активации испытываемого полупроводника?

10. При какой частоте внешнего электромагнитного излучения возможна ионизация атома водорода, находящегося в нормальном состоянии?

Задачи с решениями

10.1. Два лазера со средней мощностью излучения по 50 Вт каждый излучают на длинах волн 1,1 мкм и 0,63 мкм при одинаковых диаметрах лучей. Какой из них оказывает большее давление на поверхность цели, поглощающей излучение?

Дано: $P = 50$ Вт; $\lambda_1 = 1,1$ мкм = $1,1 \cdot 10^{-6}$ м; $\lambda_2 = 0,63$ мкм = $6,3 \cdot 10^{-6}$ м.

$F_1/F_2 = ?$

Решение. В соответствии со вторым законом Ньютона сила давления на поверхность, осуществляемая одним фотоном:

$$f = \frac{dp}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{h}{\lambda} \right),$$

где p — импульс фотона. Соответственно, сила давления N фотонов

$$F = \frac{h}{\lambda} \cdot \frac{dN}{dt}.$$

Частоту ударов dN/dt можно найти, исходя из мощности луча и энергии одного фотона $h\nu = hc/\lambda$:

$$P = \frac{hc}{\lambda} \cdot \frac{dN}{dt},$$

откуда

$$\frac{dN}{dt} = \frac{P\lambda}{hc}.$$

Таким образом,

$$F = \frac{h}{\lambda} \cdot \frac{P\lambda}{hc} = \frac{P}{c}.$$

Ответ. Давление лучей одинаково — оно определяется только мощностью.

10.2. С какой частотой должны бомбардировать цель фотоны химического лазера, излучающего на длине волны 308 нм, чтобы воздействие на нее было таким же, как очереди из автомата Калашникова? Масса и скорость пули 7,9 г и 715 м/с соответственно, скорострельность — 600 мин⁻¹.

Дано: $m = 7,9$ г = $7,9 \cdot 10^{-3}$ кг; $v = 715$ м/с; $\nu = 600$ мин⁻¹ = 10 с⁻¹; $\lambda = 308$ нм = $3,08 \cdot 10^{-7}$ м.

$\frac{dN}{dt} = ?$

Решение. Мощность воздействия на цель автоматной очереди

$$P = v \frac{mv^2}{2},$$

а мощность лазерного излучения

$$P = \frac{hc}{\lambda} \cdot \frac{dN}{dt}.$$

Отсюда

$$v \frac{mv^2}{2} = \frac{hc}{\lambda} \cdot \frac{dN}{dt}.$$

Следовательно,

$$\frac{dN}{dt} = \frac{v m v^2 \lambda}{2hc}.$$

Подставляя данные, получим

$$\frac{dN}{dt} = 3,1 \cdot 10^{22} \text{ с}^{-1}.$$

10.3. Какой должна быть энергия импульса химического лазера, чтобы прожечь броню танка толщиной 8 см за 0,1 с, если площадь светового пятна на броне 1 см², длительность импульсов 1 мкс, а частота их следования 100 Гц? Плотность брони 7,8 · 10³ кг/м³, а ее удельная теплота плавления 84 кДж/кг. Потери энергии на отражение луча от брони и ее рассеяние вне светового пятна составляют 30%.

Дано: $T = 0,1 \text{ с}$; $f = 100 \text{ Гц}$; $\tau = 1 \text{ мкс} = 10^{-6} \text{ с}$; $d = 8 \text{ см} = 8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $S = 1 \text{ см}^2 = 10^{-4} \text{ м}^2$; $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 84 \text{ кДж/кг} = 8,4 \cdot 10^4 \text{ Дж/кг}$; $\eta = 0,7$.

$W_{\text{имп}} - ?$

Решение. За время t броней должна быть поглощена энергия, достаточная для расплавления ее участка с поперечным сечением, равным площади светового пятна:

$$Q_{\text{пл}} = \lambda \rho S d.$$

Средняя за период энергия луча

$$Q_{\text{ср}} = \frac{\eta W_{\text{имп}}}{T}.$$

Необходимое число импульсов

$$N = \frac{Q_{\text{пл}}}{Q_{\text{ср}}} = \frac{\lambda \rho S d T}{\eta W_{\text{имп}} \tau} = \frac{t}{T}.$$

Отсюда

$$W_{\text{имп}} = \frac{\lambda \rho S d T^2}{\eta t \tau} = \frac{\lambda \rho S d}{\eta \tau f^2}.$$

Подставляя данные, получим $W_{\text{имп}} = 7,49 \text{ МДж}$.

10.4. Температурный коэффициент сопротивления полупроводникового терморезистора ТКП-20 при температуре 20°C равен $-2 \cdot 10^{-2} \text{ К}^{-1}$. Каков температурный коэффициент сопротивления при температуре 80°C?

Дано: $T_1 = 293 \text{ К}$; $T_2 = 353 \text{ К}$; $\alpha_1 = -2 \cdot 10^{-2} \text{ К}^{-1}$.

$\alpha_2 - ?$

Решение. Пользуясь формулами (10.4) и (10.5), получим

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{1}{R} C e^{E_g/(2kT)} \left(-\frac{E_g}{2kT^2} \right) = -\frac{E_g}{2kT^2}.$$

Соответственно,

$$\alpha_1 = -\frac{E_g}{2kT_1^2}, \quad \alpha_2 = -\frac{E_g}{2kT_2^2}, \quad \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2, \quad \alpha_2 = \alpha_1 \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2.$$

Подставляя данные, получим $\alpha_2 = -1,38 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$.

10.5. На панель кремниевого фотоэлемента размером 10×10 см падает нормально солнечный свет интенсивностью $1,2 \text{ кВт/м}^2$. Интегральная фоточувствительность элемента 10 мА/Вт . Какой максимальный ток он может отдавать в нагрузку?

Дано: $S = 100 \text{ см}^2 = 10^{-2} \text{ м}^2$; $J = 1,2 \text{ кВт/м}^2 = 1,2 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$; $\gamma = 10 \text{ мА/Вт} = 10^{-2} \text{ А/Вт}$.

$I_m = ?$

Решение. Вольтамперная характеристика фотоэлемента соответствует формуле (10.7). Максимальный ток во внешней цепи течет при сопротивлении внешней нагрузки $R = 0$, т.е. при коротком замыкании его контактов. Тогда из формулы (10.7) следует (без учета знаков): $I_m = I_\phi = \gamma JS$.

Подставляя данные, получим $I_m = 120 \text{ мА}$.

Задачи для самостоятельного решения

10.6. Луч газового лазера, излучающего на длине волны $0,63 \text{ мкм}$, имеет диаметр 3 мм и мощность 1 мВт . Какое давление он оказывает на поверхность, отражающую 20% света?

10.7. Какова вероятность того, что в металле при температуре 27°C электрон имеет энергию: а) больше уровня Ферми на 10^{-2} эВ ; б) меньше уровня Ферми на 10^{-2} эВ ?

10.8. Кристалл содержит $0,1$ моля вещества. Каков средний интервал между энергетическими уровнями его валентной зоны, ширина которой 6 эВ ?

10.9. При температуре 27°C и обратном напряжении $0,5 \text{ В}$ через кремниевый диод протекает ток $2 \cdot 10^{-3} \text{ мкА}$. Пользуясь упрощенной формулой вольтамперной характеристики, определите силу тока при смене полярности напряжения.

10.10. У полупроводникового терморезистора при температуре 20°C температурный коэффициент сопротивления равен $-4,2 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$. Какова ширина запрещенной зоны материала терморезистора?

Глава 11

АТОМНОЕ ЯДРО И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Наука — это явление, вуалирующее чудовищ.

Чудовища — это явления, в которые не проникла наука.

В результате изучения данной главы учащийся должен:

знать

- предмет, цели, основные понятия, модели и положения ядерной физики;
- структуру и свойства атомного ядра;
- физическую сущность ядерных сил, определяющих его энергию связи;
- природу радиоактивности и закон радиоактивного распада;
- физическую сущность реакций деления, синтеза и поражающих факторов ядерного взрыва;

уметь

- распознавать, вычленять и анализировать закономерности ядерной физики в изучаемых объектах природы и техники;
- формулировать изучаемую военно-техническую задачу с позиций законов ядерной физики и применять ее аппарат для решения задачи;

владеть

- навыками применения законов ядерной физики при решении военно-технических задач, сформулированных как физические;
 - навыками привлечения физических констант, справочных данных, оценки порядка величин и опоры на их размерности при решении задач ядерной физики.
-

11.1. Строение атомного ядра

На протяжении своей истории человек выявлял все более глубокие основы материи. В первой половине XX в. это привело его на уровень атомного ядра. Выяснилось, что оно содержит практически всю массу атома, а его положительный заряд $Z|e_0|$ компенсирует отрицательные заряды электронов его оболочки. Поскольку Z — это **зарядовое число**, равное порядковому номеру химического элемента в таблице Менделеева, т.е. числу его электронов, то носитель положительного заряда имеет заряд e_0 , равный элементарному. Им оказался **протон** (от греч. *protos* — первый) — первая из частиц, обнаруженных при бомбардировке ядер. Масса протона в 1836 раз больше массы электрона, но и это столь малая величина, что в ядерной физике пользуются внесистемной **атомной единицей массы** (а.е.м.). Она составляет $1/12$ массы ядра углерода $^{12}_6\text{C}$: $1 \text{ а.е.м.} \approx 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$. Масса протона $m_p = 1,0073 \text{ а.е.м.}$ Удобно пользоваться также **энергетическим эквивалентом массы**: $1 \text{ а.е.м.} \cdot c^2 = 931,5 \text{ МэВ}$. Например, $m_p = 938,28 \text{ МэВ}$ (сомножитель c^2 опускают, так как он подразумевается).

Целое число а.е.м., которым определяют массу ядра, называется его **массовым числом** A . Химические элементы обозначают в виде A_ZX , например ${}^1_1\text{H}$ (у протона $A = Z = 1$). Встречаются самые разные сочетания Z и A , например ${}^{40}_{20}\text{Ca}$, ${}^{40}_{18}\text{Ar}$, т.е. A одинаковы, а Z различны. Такие элементы называют **изобарами**. Бывает и наоборот: атомы *одного и того же* химического элемента имеют одинаковые Z , но разные A . Их называются **изотопами** и присваивают иногда даже разные названия и обозначения: ${}^1_1\text{H}$ — *протий*, ${}^2_1\text{H}$ (D) — *дейтерий*, ${}^3_1\text{H}$ (T) — *тритий*. Такие элементы, как олово, имеют множество изотопов. Наличие изотопов объясняет, почему массовые числа элементов в таблице Менделеева отличаются от целых: они усреднены по природному изотопному составу.

У всех ядер, кроме водорода, $A > Z$, причем чем тяжелее элемент, тем сильнее это неравенство. Оно указывает на наличие в ядре частиц, повышающих его массу, но не влияющих на заряд и, следовательно, *нейтральных*. Так как массы всех ядер практически кратны m_p , то и эта частица должна иметь массу, близкую к m_p . В 1932 г. английский физик Д. Чэдвик (1891—1974, Нобелевская премия 1935 г.) открыл предсказанный Резерфордом **нейтрон** n , имеющий $Z_n = 0$ и $m_n = 939,9$ МэВ. В этом же году российский физик Д. Иваненко (1904—1994) и В. Гейзенберг независимо друг от друга предположили, что ядро состоит из протонов и нейтронов, получивших *общее* название **нуклоны** (от англ. *nuclear* — ядерный). У них не только почти одинаковы массы и спины ($1/2$ в единицах \hbar) — их даже можно рассматривать как *два зарядовых состояния одной и той же частицы*, поскольку в ядре они непрерывно превращаются друг в друга. В то же время в свободном состоянии протон — *стабильная* частица, а нейтрон *распадается* за время порядка минут.

Поскольку электрический заряд распределен по ядру несимметрично, оно имеет **электрический момент**, зависящий от формы ядра. Имеет оно и **магнитный момент** μ . Он определяется спинами нуклонов и оказывается эффективным индикатором вида ядер и, соответственно, состава вещества. Вектор μ испытывает *прецессию* (см. параграф 3.3) вокруг линий переменного магнитного поля. Когда частота этого поля совпадает с собственной частотой прецессии, возникает **ядерный магнитный резонанс** (ЯМР) — резонансное поглощение энергии источника переменного поля. За открытие этого явления американские физики И. Раби (1898—1988) в 1944 г., а Ф. Блох (1905—1983) и Э. Парселл (1912—1997) в 1952 г. были удостоены Нобелевских премий. В 1970-е гг. ЯМР стали применять для получения весьма информативных изображений объектов физики, химии и биологии, в том числе внутренних органов человека.

ВОПРОС. Как различаются плотности разных ядер, если радиус R ядра связан с его массовым числом соотношением $R \approx 10^{-15} A^{1/3}$ м?

ОТВЕТ. Поскольку $A \sim R^3$, т.е. масса ядра пропорциональна его объему, то *плотность ядер разных химических элементов примерно одинакова*. Величина ее огромна: $\sim 10^{11}$ кг/см³. Существуют и реальные объекты (нейтронные звезды) с такой плотностью вещества.

Долгое время основную загадку ядра составляла его **стабильность** (как в свое время стабильность атома): несмотря на колоссальные силы куло-

новского расталкивания протонов, оно не разлетается. В 1934 г. советский физик И. Е. Тамм (1895—1971, Нобелевская премия 1958 г.) предположил, что сильное взаимодействие между нуклонами внутри ядра подобно электромагнитному в том смысле, что является *обменным*: если заряженные частицы обмениваются *фотонами*, то здесь, вероятно, действуют еще какие-то частицы. Для их поиска необходимо предварительно оценить массу частиц, для чего можно воспользоваться соотношением неопределенностей (9.17). Когда электрон излучает или поглощает фотон, энергия изменяется на $\Delta W = \hbar\omega$. Если это происходит за время $\Delta t < \hbar/\Delta W$, то соотношение неопределенностей такую процедуру допускает: она не приводит к нарушению закона сохранения энергии. Поэтому радиус взаимодействия: $r_{\max} < c\Delta t = \hbar c/\Delta W$.

ВОПРОС. Каков отсюда радиус электромагнитного взаимодействия?

ОТВЕТ. Поскольку для фотона энергия ΔW пропорциональна частоте, а она может быть сколь угодно мала, *радиус электромагнитного взаимодействия неограничен.*

Такой подход позволяет оценить и массу искомой частицы.

ВОПРОС. Каков радиус взаимодействия при обмене *частицами* массой m ?

ОТВЕТ. Их минимальная энергия ограничена значением $\Delta W_{\min} = mc^2$. Следовательно, $r_{\max} < \hbar c/(mc^2)$, где m — масса покоя частицы. Сопоставляя r_{\max} с размером ядра $\sim 10^{-15}$ м, получаем $m \approx (200 \div 300)m_e$, где m_e — масса покоя электрона.

Существование таких частиц предсказал японский физик Х. Юкава (1907—1981, Нобелевская премия 1949 г.), и они действительно были найдены в космических лучах в 1947 г. Поскольку у них масса средняя между массами электрона и нуклона, они названы *мезонами* (от греч. *mesos* — средний), в данном случае — *π -мезонами* (*пионами*) (сначала были обнаружены μ -мезоны (мюоны), но они не соответствовали предъявляемым требованиям).

Заряженные пионы π^+ и π^- имеют массу $273 m_e$, а нейтральный π^0 — $264 m_e$. В свободном состоянии эти частицы нестабильны (время жизни заряженных $\sim 10^{-8}$ с, а нейтрального — $\sim 10^{-16}$ с). Однако в ядре они распадаться не успевают, связывая нуклоны по следующим схемам:

$$p \rightleftharpoons \pi^0 \rightleftharpoons p; \quad p \rightleftharpoons \pi^- \rightleftharpoons n; \quad n \rightleftharpoons \pi^0 \rightleftharpoons n; \quad n \rightleftharpoons \pi^+ \rightleftharpoons p; \quad p \rightleftharpoons \pi^+ \rightleftharpoons n.$$

Эти схемы иллюстрируют в том числе взаимопревращение нуклонов.

Облако пионов вокруг нуклонов формирует *поле ядерных сил*, подобно тому как облако фотонов вокруг зарядов создает поле электромагнитных сил. Именно обмен пионами определяет **сильное взаимодействие** нуклонов, которое относится к числу четырех фундаментальных взаимодействий (см. параграф 12.10). Оно осуществляется между *любыми* нуклонами, но *только в пределах размера ядра* $\sim 10^{-15}$ м.

Как и любые другие силы, ядерные силы определяют энергию взаимодействия, в данном случае — **энергию связи ядра**. В классической физике энергию взаимодействия объектов вычисляют как работу по их удалению на такие расстояния, где взаимодействие между ними прекращается. Для этого интегрируют зависимость соответствующей силы от расстояния между объектами. Так можно найти энергию связи ракеты с Землей или одно-

го заряда с другим. Однако в *квантовой* системе такую зависимость нельзя получить в принципе — детерминизм, позволяющий найти зависимость силы от координат, здесь отсутствует. Но можно пойти иным путем, который опирается на конечные результаты.

ВОПРОС. В каком случае суммарная энергия Земли и ракеты больше: когда она стоит на стартовой площадке или находится вблизи Юпитера?

ОТВЕТ. Естественно, в последнем случае, так как потенциальная энергия взаимодействия возросла. Точно так *разрозненные* нуклоны имеют бóльшую энергию, чем объединенные в ядро. В таком случае суммарная энергия входящих в ядро нуклонов должна быть больше массы ядра! Исходя из соотношения $E = mc^2$, получаем, что это же относится и к массе. Следовательно, энергия связи ядра $E_{св}$ определяется разностью масс двух описанных состояний:

$$E_{св} = c^2\{[Zm_p + (A - Z)m_n] - m_я\}, \quad (11.1)$$

где $A - Z$ — число нейтронов; $m_я$ — масса ядра.

Выражение в фигурных скобках называется **дефектом массы ядра**. Если не стремиться к очень высокой точности расчета, то вместо m_p можно использовать массу атома водорода m_H , а вместо m_n — массу атома $m_{ат}$. При этом массы электронов, прибавленные в первом члене правой части и вычитаемом, почти компенсируют друг друга (компенсация неполная, так как энергии связи электронов у многоэлектронных атомов и у водорода разные).

Поскольку энергии связи ядер различных химических элементов различны, то для их сопоставления энергию связи ядра определяют в расчете на один нуклон и называют **удельной энергией связи**:

$$E_{уд} = \frac{E_{св}}{A}. \quad (11.2)$$

Зависимость $E_{уд}(A)$ показана на рис. 11.1. Как следует из нее, по мере увеличения A $E_{уд}$ сначала быстро растет (эта ветвь показана усредненно), а далее медленно убывает, что свидетельствует о *насыщении* ядерных сил. Оно объясняется тем, что нуклон способен взаимодействовать только с ограниченным числом других нуклонов (подобно этому атом способен взаимодействовать с ограниченным числом других, что определяется его валентностью). Поэтому увеличение числа нуклонов, т.е. A , в правой части кривой не изменяет ту часть $E_{уд}$, которая приходится на нуклоны внутренней области ядра, а влияет лишь на $E_{уд}$ тех из них, что ближе к его поверхности.

Грубо говоря, $E_{уд}$ пропорциональна площади поверхности ядра ($\sim R^2$) и обратно пропорциональна его объему ($\sim 1/R^3$), т.е. $E_{уд} \sim R^{-1}$.

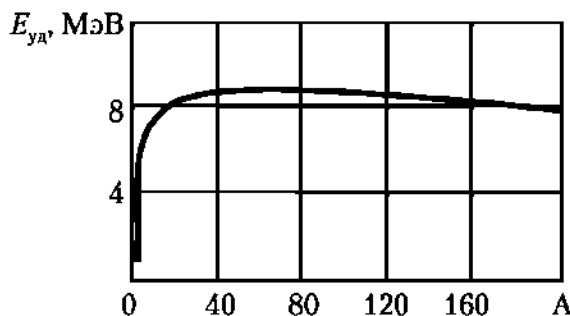


Рис. 11.1

11.2. Радиоактивность

Как следует из рис. 11.1, нуклоны ядра наиболее прочно связаны друг с другом в диапазоне $A \approx 50 \div 70$, где $E_{\text{уд}} \approx 8,7$ МэВ/нуклон. Это состояние энергетически самое выгодное и потому наиболее устойчивое. По аналогии наиболее устойчиво положение тел на поверхности Земли. Однако ядра с другими значениями A также вполне устойчивы, как устойчивы высокая башня или бильярдный шар на горизонтальном столе. И все же, чем больше ядро, тем труднее ему сохранять целостность: центральные и периферийные протоны уже не могут обмениваться пионами, но расталкиваются кулоновскими силами. Поэтому малейшее нарушение баланса ядерных и кулоновских сил в результате *пульсаций* ядра или попадания в него постороннего «снаряда» приводит к его раскалыванию. Впервые такое явление зафиксировали французские физики А. Беккерель (1852–1908), П. Кюри (1859–1906) и М. Склодовская-Кюри (1867–1934), лауреаты Нобелевской премии 1903 г. У солей урана, полония и радия они обнаружили лучи, интенсивность которых не зависела от внешних условий (температуры, давления и пр.). Они проникали сквозь экраны, ионизировали газ, а в исходном материале появлялись легкие элементы, которых раньше в нем не было.

Самопроизвольное превращение одних ядер в другие, сопровождаемое испусканием различных частиц, называется **радиоактивностью** (по «имени» радия).

Радиоактивное излучение содержит α -частицы (ядра гелия), β -частицы (электроны или позитроны), нейтроны и γ -лучи (электромагнитное излучение, $\lambda \approx 10^{-13} \div 10^{-11}$ м). Имея весьма высокие энергии, эти частицы ионизируют атомы вещества, поэтому радиоактивное излучение называют также **ионизирующим**.

ВОПРОС. Почему радиоактивность приводит к превращениям химических элементов?

ОТВЕТ. Выбрасывая частицы, ядро изменяет A и (или) Z .

Если это происходит *самопроизвольно*, то реакцию называют **собственной (естественной) радиоактивностью**. Если же она происходит в результате *внедрения в ядро частицы*, то реакцию называют **искусственной (наведенной) радиоактивностью**. Последнюю открыли французские физики И. и Ф. Жолио-Кюри (Нобелевская премия 1935 г.): после облучения α -частицами ядра алюминия, бора и магния становились радиоактивными.

Когда именно произойдет распад данного ядра, предсказать невозможно: это процесс *статистический*, зависящий от неконтролируемых случайностей внутри него. Поэтому закономерности ядерного распада устанавливают на больших ансамблях частиц. Как и при всяком статистическом процессе, число dN распадов (случайных событий) пропорционально числу N исходных нестабильных ядер и времени dt наблюдения: $dN = -\lambda N dt$, где коэффициент пропорциональности λ называется **постоянной распада**. Разделяя переменные и интегрируя от 0 до t и от исходного числа ядер N_0 до N , получим

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt, \quad N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (11.3)$$

Последнее выражение называется **законом радиоактивного распада**. На практике часто используют *период полураспада*.

Периодом полураспада называют время $T_{1/2}$, в течение которого распадается половина исходного числа ядер.

Подставляя в левую часть формулы (11.3) $N = N_0/2$, получим

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \quad (11.4)$$

Для разных ядер значения λ , а следовательно, и $T_{1/2}$ изменяются в очень широких пределах. Например, у ядра ^{134}I $T_{1/2} \sim 53$ мин, а у ядра ^{238}U $T_{1/2} \sim 10^9$ лет.

Ядро, как и атом, представляет собой потенциальную яму. В результате туннельного эффекта (см. параграф 9.7) из нее могут выбрасываться, например, α -частицы с разными энергиями (α -распад) и сопутствующие γ -кванты, имеющие линейчатый спектр. Это свидетельствует о наличии у ядра *различных энергетических уровней* (оболочечная модель ядра). Они определяют и обратный процесс: *резонансное поглощение* ядром γ -квантов.

Исходное ядро ядерной реакции называют **материнским**, а ядра, возникшие в результате реакции, — **дочерними**. Как и в других физических явлениях, при ядерных реакциях выполняются **законы сохранения** зарядовых и массовых чисел, энергии, импульса, момента импульса (спина) и т.д. Зачастую они служат эффективным инструментом открытий. Например, при β -распаде углерода выполняется сохранение массового и зарядового чисел:



а энергия, уносимая β -частицами, должна иметь вполне определенную величину:

$$\Delta E = 931,5[M_X - (M_Y + M_Z)], \text{ МэВ}. \quad (11.6)$$

Здесь X — материнское, а Y и Z — дочерние ядра. Однако в этой реакции были обнаружены три странности, которые отражает многозначие в формуле (11.5). Во-первых, ΔE непостоянна — формула (11.6) определяет только максимальное ее значение. Во-вторых, спин дочернего ядра азота оказался таким же, как у материнского, несмотря на то что электрон «уносит» спин $1/2$ (в единицах \hbar). В-третьих, дочерние частицы должны иметь противоположно направленные импульсы, чтобы в сумме дать тот же нулевой импульс системы (материнского ядра), а они оказываются друг к другу под углом.

В 1931 г. швейцарский физик В. Паули предположил, что в реакции (11.5) скрыто присутствует какая-то нейтральная частица со спином $1/2$. Из (11.5) следует, что ее масса пренебрежимо мала, поэтому, чтобы унести недостающий импульс, ее скорость должна быть соизмерима со скоростью света. На основе этой гипотезы итальянский физик Э. Ферми разработал количественную теорию β -распада, назвав таинственную частицу **нейтрино** (маленький нейтрон). Впоследствии выяснилось, что при β -распаде возникает не нейтрино ν , а **антинейтрино** $\bar{\nu}$. Реакция (11.5) вызвана тем, что нейтрон, входящий в состав ядра $^{14}_6\text{C}$, распадается по схеме



В реакции (11.5) недостает именно $\bar{\nu}$. Поскольку в реакции (11.7) разность масс покоя (а значит, и энергий) нейтрона и протона распределяется между электроном и антинейтрино по-разному, наблюдается не одно значение энергии электрона, а целый их спектр.

Таким образом, нуклоны могут взаимодействовать не только с помощью пионов, но и с помощью легких частиц — электронов и нейтрино. Такое взаимодействие называют **слабым**, и оно относится к числу четырех фундаментальных взаимодействий.

Экспериментально обнаружить нейтрино крайне сложно, так как они обладают огромной проникающей способностью, практически не взаимодействуя с веществом: из 10^{11} нейтрино только одно может застрять в земном шаре! Тем не менее они были обнаружены американскими физиками Ф. Райнесом (1918—1998, Нобелевская премия 1995 г.) и К. Коуэном (1919—1974, умер до присуждения премии). Вопрос о массе покоя нейтрино долгое время не был решен, хотя он весьма важен: нейтрино так же распространены в природе, как фотоны, и могут быть ответственны за так называемую скрытую массу галактик. В 2015 г. канадский физик А. Макдональд и японский физик Т. Каджита удостоены Нобелевской премии по физике за эксперименты, доказывающие, что нейтрино обладает массой.

11.3. Реакция деления

Существует множество ядерных реакций, но некоторые из них сыграли в истории человечества особую роль. Она связана с тем, что в результате ядерной реакции выделяется энергия, так как у дочерних ядер возрастает удельная энергия связи. Аналогия — тело, падающее на Землю, или рекомбинация положительного иона и электрона. Отсюда следует, что с выделением энергии должны происходить реакции, приводящие к увеличению A слева от максимума кривой на рис. 11.1, т.е. **реакции синтеза**, и уменьшению A справа от него, т.е. **реакции деления**. В качестве «снарядов», вызывающих реакцию деления, наиболее эффективны нейтроны: не имея заряда, они не испытывают кулоновского отталкивания от ядра и потому гораздо легче в него проникают.

В 1938 г. немецкие физики О. Ган (1879—1968) и Ф. Штрассман (1902—1980) доказали: при облучении нейтронами урана, находящегося в конце таблицы Менделеева, образуются барий и другие элементы из ее середины (Нобелевская премия 1944 г.). В следующем, 1939 г., английский физик О. Фриш (1904—1979) и австрийский физик Л. Мейтнер (1878—1968) объяснили этот результат *реакцией деления* (расщепления) ядра урана на примерно равные осколки. Теорию этого явления, основанную на представлении ядра как капли жидкости, разработал в том же 1939 г. советский теоретик Я. И. Френкель, а затем развили Н. Бор и американский физик Дж. Уиллер (1911—2008). При малых деформациях ядро-капля пульсирует, вытягиваясь и сжимаясь под влиянием противодействующих друг другу электростатических и ядерных сил. При сообщении ядру **энергии активации** амплитуда колебаний достигает критического значения, и оно разрывается. Это и осуществляет нейтрон, вносящий в ядро свою *энергию связи* и свою *кинетическую энергию*. Стадии деления ядра-капли схематично показаны на рис. 11.2.

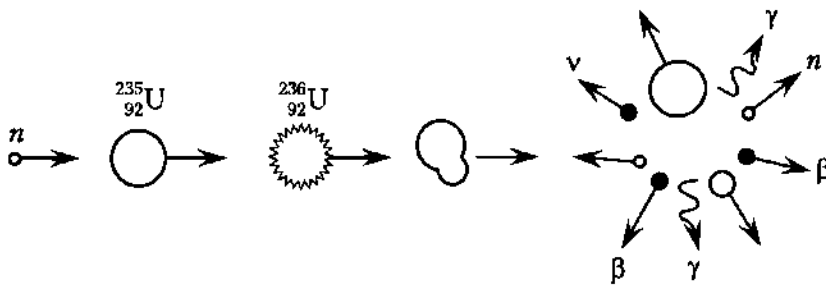
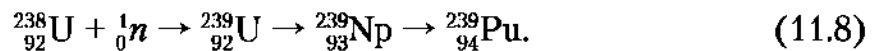


Рис. 11.2

У разных изотопов урана энергии активации различны. Изотоп $^{235}_{92}\text{U}$ при захвате нейтрона превращается в $^{236}_{92}\text{U}$, энергия активации которого 6,6 МэВ. Поскольку энергия связи, внесенная нейтроном, составляет 6,8 МэВ, то для деления ядра достаточно нейтрона с нулевой кинетической энергией. Такие медленные, *тепловые*, нейтроны даже эффективнее, чем быстрые, так как дольше находятся вблизи ядра, от чего вероятность их захвата возрастает.

В природном уране, однако, преобладает изотоп $^{238}_{92}\text{U}$, который при захвате нейтрона превращается в $^{239}_{92}\text{U}$. Его энергия активации больше — 7 МэВ, а $E_{\text{уд}}$, привнесенная нейтроном, меньше — 6 МэВ, так как ^{238}U находится правее, чем ^{235}U , на кривой рис. 11.1. Следовательно, для деления $^{238}_{92}\text{U}$ нейтроны должны дополнительно иметь кинетическую энергию > 1 МэВ, т.е. этот изотоп делится *быстрыми нейтронами*. При облучении же медленными нейтронами происходит их *захват* без деления:



Возникающий в конце этой цепочки стабильный $^{239}_{94}\text{Pu}$ также применяют в качестве делящегося вещества. У него A больше, чем у $^{238}_{92}\text{U}$, но больше и Z , т.е. кулоновские силы, вызывающие нестабильность ядра, возрастают, поэтому для его деления достаточно и тепловых нейтронов.

Поскольку у ядра урана $E_{\text{уд}} = 7,6$ МэВ, а у элементов, на которые он распадается, $\sim 8,7$ МэВ, то *на каждый нуклон* высвобождается $\sim 1,1$ МэВ, а их в ядре ~ 200 . Следовательно, при делении одного ядра выделяется ~ 200 МэВ, а из ядер 1 г $^{235}_{92}\text{U}$ можно получить $8 \cdot 10^{10}$ Дж! Это и есть та колоссальная энергия, которую предсказал Эйнштейн своей знаменитой формулой (2.44). Основная ее часть выделяется в виде *кинетической энергии* «осколков» ядра: на расстояниях, больших радиуса действия ядерных сил, их расталкивают огромные кулоновские силы. Важно и другое. В тяжелых ядрах на один протон приходится больше нейтронов, чем в средних и легких. Поэтому возникшие при делении осколки перегружены нейтронами, и от лишних они освобождаются. Например, при делении ^{235}U выделяется в среднем 2,5, а ^{239}Pu — 2,9 «лишних» нейтрона, каждый из которых также может быть возбудителем деления ядер.

В 1939 г. советские физики Я. Б. Зельдович и Ю. Б. Харитон и независимо от них Э. Ферми, Л. Сциллард, Ф. Жолио-Кюри и Л. Мейтнер пришли к выводу о возможности осуществления *цепной ядерной реакции*, при которой должно возникнуть *лавинобразное нарастание выделяющейся энергии*. Такое же лавинобразное нарастание актов реакции происходит, например, при газовом разряде, возгорании рабочей смеси в цилиндре двигателя и т.д.

Для реализации идеи ядерного взрыва важно, что вероятность захвата нейтрона ядром существует лишь до тех пор, пока он пролетает сквозь тол-

щущу урана. Следовательно, вероятность генерации нейтронов пропорциональна *объему* куска урана ($V \sim R^3$), а вероятность их потери — *площади* его поверхности ($S \sim R^2$). Из этих соотношений следует, что для осуществления взрыва нужно увеличивать R — существует некая минимальная масса (объем) урана, меньше которой цепная реакция деления не возникнет. Ее назвали **критической массой** и определяли путем весьма опасных экспериментов, чреватых взрывом и подвергавших людей радиации. Для ^{239}Pu критическая масса составляет ~ 17 кг.

Здесь важны форма изделия, плотность материала и процентное содержание примесей, которые могут захватывать нейтроны без деления. Сумму всех этих факторов характеризует **коэффициент k размножения нейтронов**. Он равен *отношению числа нейтронов в последующем звене реакции к их числу в предыдущем ее звене*. Очевидно, что при $k < 1$ реакция *затухает*; при $k = 1$ число нейтронов остается постоянным, и реакция является *самоподдерживающейся* (критический режим), а при $k > 1$ реакция *развивается* в виде цепной.

Возникла впечатляющая перспектива: самоподдерживающаяся реакция деления может стать неслыханным по эффективности стационарным источником энергии, а цепная — оружием, мощность которого в значительной степени превзойдет мощность динамита, изобретенного А. Нобелем в 1866 г.

11.4. Физические основы ядерной энергетики

Э. Ферми и Л. Сциллард в конце 1930-х гг. получили патент на ядерный реактор, который был реализован в США в 1942 г. В СССР он был создан в 1946 г., а в 1954 г. в нашей стране создана первая промышленная атомная электростанция (АЭС) мощностью 5 МВт.

При делении природного ^{238}U выделяются нейтроны с энергиями $\sim 0,7$ МэВ, которые не могут вызвать его цепную реакцию, но способны делить ядра ^{235}U , особенно если энергию нейтронов понизить. При **управляемой реакции деления** этой цели служат **замедлители** — ядра, при столкновении с которыми нейтроны не захватываются, но эффективно теряют энергию. Таким требованиям удовлетворяют бериллий, углерод (в виде графита) и дейтерий, содержащийся в тяжелой воде. Так работают реакторы **на медленных нейтронах** (рис. 11.3). Их топливо обогащают изотопом ^{235}U , отделяя его от изотопа ^{238}U , например, с помощью диффузии (см. параграф 4.4). Отдельные блоки 1 урана размещают, например, в графитовом замедлителе 2. Тепловая энергия, выделяющаяся при делении, воспринимается циркулирующим теплоносителем 3, в качестве которого служит либо та же тя-

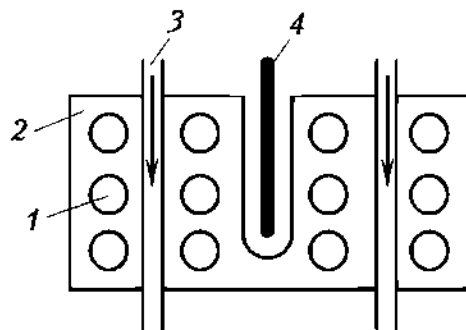


Рис. 11.3

желая вода, либо щелочной металл. Коэффициент размножения нейтронов регулируется автоматически (на уровне $k = 1$) подъемом или опусканием стержня 4 (кадмий или карбид бора), который эффективно поглощает нейтроны.

Если природный уран *обогащают* изотопом ^{235}U , то реакция поддерживается и без замедлителя. Такие **реакторы на быстрых нейтронах** не только производят энергию, но и используют реакцию (11.8) для производства ^{239}Pu . Поэтому их называют **размножителями**, или **бридерами**. В нашей стране, например, разработан такой реактор на 1500 МВт.

В 1972 г. французский физик Ф. Перрен обнаружил в Африке (Габон) природный (!) ядерный реактор, который сотни тысяч лет работал в богатых ураном подземных жилах. Замедлителем нейтронов служила вода, кипевшая в результате выделения ядерной энергии.

Ядерные реакторы не только занимают заметное место в энергетическом балансе развитых стран, но и применяются в качестве силовых установок кораблей и подводных лодок, что обеспечивает длительную автономность плавания. Эксплуатация ядерных реакторов требует повышенных мер безопасности, о чем свидетельствуют известные аварии (Чернобыль, Фукусима и т.д.). Крупномасштабные экологические последствия может вызвать также гибель атомных подводных лодок, неудачные захоронения ядерных отходов и т.д.

Плоды ядерных реакций применяют и в виде радиоактивных изотопов. Они имеют такие же электронные оболочки и, следовательно, такие же физико-химические свойства, как и стабильные изотопы. Поэтому, пользуясь их ничтожными примесями, можно легко контролировать разнообразные физико-химические, технологические и биофизические процессы. Например, истирание поршневых колец в цилиндре двигателя можно контролировать по изменению радиоактивности масла, уносящего частицы металла. Точно так же можно проследить за усвоением лекарства в организме человека и даже узнать время жизни и гибели органического материала, найденного в археологических раскопках по его останкам. В основе такого *радиоуглеродного анализа* лежит следующее. Образуемые космическими лучами нейтроны, воздействуя на атмосферный азот, вызывают реакцию



а радиоуглерод $^{14}_6\text{C}$ служит инструментом археологической датировки. Он усваивается земной флорой и фауной точно так же, как и обычный углерод, и в то же время подвержен β -распаду (11.5). Его период полураспада ~ 5730 лет удачно коррелирует с временными историческими масштабами. В тканях животных и растений устанавливается стационарный процент $^{14}_6\text{C}$, а после прекращения обмена веществ он уменьшается по закону (11.3). Поэтому, определив процентное содержание радиоуглерода, нетрудно найти примерную дату гибели растительного или биологического объекта культуры на протяжении прошедших ~ 80 тыс. лет (на больших временных отдалениях радиоуглерода слишком мало, чтобы обеспечить приемлемую точность измерений). За разработку этого метода американский физик (и химик) У. Либби (1908—1980) был в 1960 г. удостоен Нобелевской премии.

Радиоактивные изотопы применяют также в качестве *датчиков* (уровнемеры, толщиномеры и т.д.). В сочетании с устройствами регулирования они позволяют *автоматизировать* различные технологические процессы.

В *радиационной химии* получают материалы с новыми свойствами, а в *радиационной биологии* и медицине изменяют наследственные признаки и борются с онкологическими заболеваниями. В сельском хозяйстве радиация позволяет получать новые культуры и влиять на всхожесть семян, а большая проникающая способность γ -лучей позволяет использовать их для обнаружения раковин, трещин и других неоднородностей в отливках, сварных швах, корпусах и деталях (гамма-дефектоскопия).

Рассеяние нейтронов применяют для *исследования строения кристаллов* (нейтронография), а поглощение гамма-квантов дает тонкий *метод анализа атомов и ядер*. Ядерные реакции позволяют также выяснять все более глубокие закономерности строения материи на основе квантовой теории и экспериментов на ускорителях, где получают в том числе новые химические элементы. Первым искусственно созданным химическим элементом был технеций с атомным номером 43 (Беркли, 1937 г.), затем были пайдены и другие. В 2005 г., например, на российском ускорителе в г. Дубне открыт новый элемент с номером 118, а позже еще семь сверхтяжелых элементов.

Особую роль ядерные реакции играют в самом разрушительном из всех видов оружия, созданных на протяжении истории человечества.

11.5. Физические основы ядерного оружия

Возможность *цепной* ядерной реакции была сразу же ориентирована на создание оружия, которое не вполне точно называли «атомным». История его создания достаточно широко известна. Первый ядерный взрыв произведен в США в 1945 г., а его результаты были использованы при бомбардировках японских городов Хиросима и Нагасаки. В СССР первый ядерный взрыв осуществлен в 1949 г.

Хранить необходимую для взрыва надкритическую массу ^{235}U или ^{239}Pu невозможно, поскольку взрыв может быть преждевременно инициирован: а) самопроизвольным делением ядер; б) нейтронами космического происхождения, которые всегда присутствуют в атмосфере. Поэтому требуемую массу разделяют на части *4*, которые при взрыве соединяют с помощью детонатора *1* и обычного заряда *2* (рис. 11.4). Для надежного инициирования реакции применяют отдельный источник первичных нейтронов. Прочный корпус *5* бомбы предотвращает преждевременный разлет делящегося вещества. В совокупности с отражателем *3* это повышает коэффициент размножения нейтронов. С этой же целью применяют сильное обжатие подкрити-

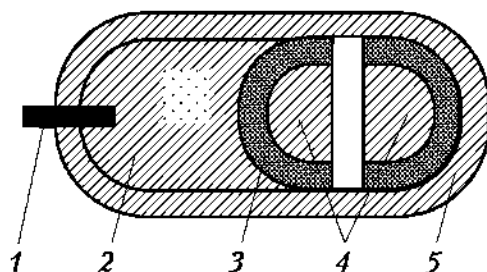


Рис. 11.4

ческой массы с помощью обычных взрывчатых веществ — повышение плотности активного вещества переводит его в надкритическое состояние.

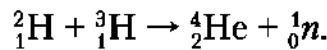
Взрыв ядерного заряда длится несколько микросекунд, а его энергию оценивают тротиловым эквивалентом, исходя из того что при взрыве 1 кг тротила выделяется $4,2 \cdot 10^6$ Дж.

Примеры практики

Бомба «Малып», сброшенная на Хиросиму, содержала 64 кг обогащенного урана и имела тротиловый эквивалент $2 \cdot 10^4$ т. К настоящему времени созданы заряды с тротиловым эквивалентом в миллионы тонн, однако развивается и обратный процесс — *миниатюризация* зарядов. Первый миниатюрный заряд (для миномета) с тротиловым эквивалентом 10–250 т был разработан в США в 1950 г., после чего найдены еще более миниатюрные решения. Так, один из самопроизвольно делящихся изотопов америция имеет критическую массу, меньшую 80 г (диаметр шара — 2,2 см), а один из изотопов калифорния — примерно 2 г! Это уже может быть основой *ручного* оружия огромной разрушительной силы, например патрона для пулемета Калашникова.

Поскольку саму критическую массу изменить нельзя, повышение мощности оружия осуществлялось в направлении повышения процента прореагировавшего вещества. В начале разработок ядерного оружия это были доли процента, теперь — десятки. И все же существует предел возможной энергии, который оценивают в 10^7 т в тротиловом эквиваленте.

Такой предел отсутствует у реакции синтеза, определяемой левым участком кривой на рис. 11.1. Он гораздо круче правого, и потому выделяется значительно большая энергия на один нуклон, чем при реакции деления, однако для слияния ядер нужно преодолеть огромные кулоновские силы. Они тем меньше, чем меньше заряд ядра, поэтому синтез производят с ядрами водорода ${}^1_1\text{H}$ и его изотопов ${}^2_1\text{H}$ (${}^2_1\text{D}$), ${}^3_1\text{H}$ (${}^3_1\text{T}$), например



Энергии связи ${}^2_1\text{H}$ — 2,23 МэВ, ${}^3_1\text{H}$ — 8,49 МэВ, а ${}^4_2\text{He}$ — 28,3 МэВ, т.е. в результате реакции энергия связи возрастает на ~17,6 МэВ, а на каждый из пяти нуклонов выделяется ~3,52 МэВ. Это почти в четыре раза больше, чем при делении урана! При синтезе ${}^4_2\text{He}$ из четырех протонов выделяется еще больше — 6,7 МэВ/нуклон!

При радиусе ядра $r \approx 2 \cdot 10^{-15}$ м для сближения ядер водорода нужна энергия $e^2/(4\pi\epsilon_0 r) \approx 0,7$ МэВ, т.е. они должны двигаться навстречу друг другу с кинетической энергией ~0,35 МэВ каждое (в лабораторной системе отсчета). Чтобы иметь достаточно ядер с такой энергией, нужна температура ~ 10^9 К, поэтому такие реакции называют **термоядерными**. В действительности нужны меньшие температуры, так как преодоление частицами потенциального барьера их расталкивания возможно благодаря туннельному эффекту, понижающему расчетную температуру реакции до ~ 10^7 К. Именно такая температура поддерживается в центре Солнца ($1,3 \cdot 10^7$ К), которое в результате термоядерной реакции теряет в секунду миллионы тонн своей массы, особенно в период солнечной активности.

Термоядерное оружие впервые испытано в СССР в 1953 г. Выдающийся вклад в его разработку внесли советские физики Я. Б. Зельдович (1914—

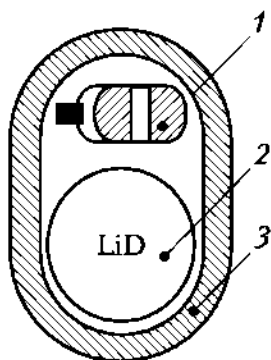


Рис. 11.5

1987), А. Д. Сахаров (1921—1989, Нобелевская премия 1975 г.), Ю. Б. Харитон (1904—1996) и другие. Несколько позже оно было создано и в США. Термоядерная бомба содержит плутониевый ядерный заряд 1 (рис. 11.5) мощностью в несколько килотонн и термоядерный заряд в контейнере из урана-238. Контейнер 3 покрыт слоем нейтронного поглотителя (соединения бора), который предотвращает преждевременный разогрев термоядерного содержимого (дейтерид лития-6) нейтронами от ядерного заряда.

При взрыве ядерного заряда 80% его энергии расходуется на мощный импульс рентгеновского излучения, которое поглощается урановой оболочкой второй (термоядерной) ступени. В результате резкого нагревания и испарения вещества оболочки возникает реактивный импульс в обратном направлении, который обжимает вторую ступень (см. параграф 2.5). Этому способствует и световое давление. При делении ядер атомов 60 г плутония объем оболочки второй ступени за время ~1 мкс уменьшается в несколько тысяч раз, и термоядерное топливо нагревается до температур ~10⁷ К. Сгорающий плутониевый стержень испускает нейтроны, взаимодействующие с литием-6, в результате чего образуется тритий:



Далее тритий взаимодействует с дейтерием в реакции (11.10) с выделением огромной энергии, 70% которой уносится быстрыми нейтронами, 20% — α-частицами и 2% — γ-квантами. Если корпус 3 бомбы изготовлен из сравнительно недорогого (природного) ²³⁸U, то под действием потока быстрых нейтронов (> 1 МэВ) возникает еще и реакция его деления.

Термоядерные (как и ядерные) боеприпасы существуют в виде авиабомб, а также боеголовок для баллистических и крылатых ракет. Мощность взрыва термоядерного заряда ограничена только его массой.

Одна из модификаций термоядерного заряда — **нейтронный боеприпас**. Это оружие сравнительно небольшой мощности (до ~10⁴ т), ориентированное в основном на действие потока нейтронов. У *делящегося* заряда такой же мощности доза проникающей радиации на том же расстоянии от эпицентра взрыва на порядок меньше. Нейтронное оружие разработано в США и СССР (1960—1980-е гг.) с целью повышения эффективности поражения живой силы, целей, защищенных броней и укрытиями, а также ракет на больших высотах, где ударная волна не образуется.

В отношении термоядерной энергии, как и ядерной, сразу же возникла параллельная задача создания стационарного ее источника. Однако здесь многолетние дорогостоящие попытки осуществить **управляемый термоядерный синтез** (УТС) к успеху пока не привели (см. параграфы 2.5, 5.9, 6.5). Термоядерная плазма обладает множеством неустойчивостей, не позволяющих ограничить ее заданным объемом. Она неизменно находит лазейку среди магнитных пробок и других средств ее удержания и, коснувшись стенок, мгновенно остывает. УТС — одна из приоритетных проблем человечества, которому в недалеком будущем грозит энергетический голод.

11.6. Физические основы поражающих факторов ядерного взрыва

В зависимости от целей применения ядерный взрыв может быть подземным и наземным, подводным и надводным, воздушным и высотным. При воздушном взрыве образуется светящийся шар с давлением $\sim 10^{14}$ Па и температурой $\sim 10^6$ К, обладающий рядом поражающих воздействий.

Ударная волна представляет собой область, ограниченную поверхностью шириной в несколько длин свободного пробега молекул, в которой давление, температура и плотность среды изменяются скачкообразно (см. параграф 7.7). Она несет до половины энергии ядерного взрыва, поражая объекты противника на значительных расстояниях. При взрыве мощностью 20 кт она проходит в воздухе 1 км за 1,4 с, 5 км — за 12 с и т.д. Поэтому человек, увидевший вспышку взрыва, имеет время для укрытия. По мере распространения ударная волна теряет энергию и вырождается в обычную звуковую волну.

На электромагнитное излучение воздушного взрыва приходится до 30% его энергии. Его часто именуют «световым», что не вполне точно, так как спектр излучения много шире видимого. Поскольку в первый момент температура в эпицентре взрыва весьма велика, максимум интенсивности излучения (см. параграф 9.1) приходится на столь короткие длины волн, что оно слабо поглощается и атмосферой, и веществом. Однако по мере быстрого (адиабатного) расширения «шара» он охлаждается (см. параграф 4.7), и этот максимум смещается в видимую и инфракрасную области спектра (см. параграф 9.1). Поэтому, несмотря на то что электромагнитное излучение распространяется со скоростью света, на расстоянии в несколько километров от эпицентра пожары начинаются лишь через 2—3 с.

Для зрения такое излучение особенно опасно ночью, когда чувствительность глаза повышается в тысячи раз. При мощности взрыва в 20 кт ожог сетчатки возникает на расстояниях до 16 км. Для защитных очков разработаны пластмассы, реагирующие на яркую вспышку за время, меньшее 1 мкс. Они поглощают 99% световой энергии, а по окончании воздействия излучения восстанавливают прозрачность за $\sim 0,5$ с. В другой конструкции применяют два поляроида, между которыми находится тонкий слой прозрачной керамики, которая под действием напряжения поворачивает плоскость поляризации на 90° (см. параграф 8.8). Напряжение подается от фотоприемника, срабатывающего под воздействием вспышки света.

Электромагнитный импульс, длящийся ~ 1 с, имеет спектр длин волн 1—1000 м. Его источником считают ионизацию молекул воздуха γ -квантами на фронте ударной волны. Увлекая с собой электроны, γ -кванты отделяют их от медленных положительных ионов, формируя тем самым переменные электромагнитные поля, которые служат источником электромагнитного импульса. Наведенные им токи и напряжения приводят к сгоранию электронных компонентов аппаратуры, перегоранию предохранителей, пробоем изоляции, повреждению трансформаторов. В результате нарушается работа компьютерной техники, систем связи, управления и сигнализации, поражается работающий с аппаратурой личный состав. Защита от воздействия электромагнитного импульса состоит в экранировании аппаратуры и линий электроснабжения, управления и связи, а также в установке предохранителей (разрядников) с большим порогом зажигания.

Наиболее специфична для ядерного взрыва **проникающая радиация**, действующая как во время взрыва, так и длительное время после него вследствие **радиоактивных осадков** и **наведенной радиоактивности**. Основные компоненты радиации — нейтроны и γ -кванты (α - и β -частицы распространяются в воздухе лишь на малые расстояния). При делении урана и плутония образуется более 200 радионуклидов в основном с массовыми числами 90—103 и 130—144 и периодами полураспада от минут до десятков лет.

По мере распространения ионизирующего излучения его интенсивность уменьшается в результате взаимодействия с веществом (см. параграф 8.6). Виды взаимодействия различны. Заряженные частицы производят ионизацию, а при торможении — рентгеновское излучение; γ -кванты поглощаются ядрами, вырывают электроны из внутренних оболочек атомов, испытывают комптоновское рассеяние и превращаются в электрон-позитронные пары (см. гл. 12); нейтроны поглощаются ядрами и вызывают вторичные реакции.

Проникающая способность излучения определяется экспонентой вида (8.27), где коэффициент поглощения μ зависит от рода излучения и свойств вещества. На практике оперируют слоем половинного ослабления $L_{1/2}$ (8.28). Защита от радиоактивного излучения определяется его видом. Поток нейтронов эффективно ослабляется ядрами легких элементов, масса которых близка к массе нейтрона (вода, парафин, полиэтилен, полипропилен). Новые типы брони содержат листы с высоким содержанием бора — хорошего поглотителя нейтронов, в броневую сталь добавляют обедненный уран и т.д. Поток γ -излучения в большей степени ослабляется тяжелыми материалами с высокой плотностью электронов, на которых оно рассеивается. Например, у свинца $L_{1/2}$ составляет 1,8 см, в то время как у воды — 18 см, а у древесины — 29 см.

11.7. Физические принципы оценки действия радиоактивного излучения

В зависимости от целей оценки действия радиации его определяют разными характеристиками.

Активность A определяет *число распадов* в единицу времени. Оно следует из формулы (11.3):

$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N. \quad (11.12)$$

Знак «минус» теряет здесь смысл, так как важна не *убыль* нестабильных ядер, а *приращение* излучения. Единицей активности является *беккерель* (Бк): $1 \text{ Бк} = 1 \text{ с}^{-1}$. Применяют и внесистемную единицу *кюри* (Ки), которая равна активности 1 г радия: $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$. Например, при аварии в Чернобыле активность составляла $5 \cdot 10^7 \text{ Ки}$, т.е. $1,85 \cdot 10^{18} \text{ Бк}$.

Воздействие ионизирующего излучения на вещество характеризуют *дозами* излучения, имеющими разный смысл в зависимости от способа определения.

Экспозиционная доза X характеризует суммарный заряд ионов одного знака, образующийся при *ионизации* 1 кг воздуха:

$$X = dQ/dm. \quad (11.13)$$

Ее распространенная внесистемная единица — *рентген* (Р):

$$1 \text{ Р} \approx 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг.}$$

Более общей характеристикой является **поглощенная доза** D , определяющая *энергию* излучения, поглощенную 1 кг массы вещества:

$$D = dW/dm. \quad (11.14)$$

Единица ее измерения — *грэй* (Гр): 1 Гр = 1 Дж/кг. Внесистемной единицей является *рад*: 1 рад = 10^{-2} Гр. Например, лучевая болезнь I степени (легкая) возникает при суммарной поглощенной дозе 150—250 рад, II степени (средняя) — 250—400 рад, III степени (тяжелая) — 400—700 рад, а IV степени (крайне тяжелая) — более 700 рад. При дозах более 5000 рад личный состав утрачивает боеспособность через несколько минут. И экспозиционная, и поглощенная дозы зависят от времени облучения, поэтому одна из мер защиты личного состава — ограничение времени пребывания в зараженной зоне. Оно определяется **мощностью дозы**, которая измеряется в Гр/ч, Р/ч и т.д.

При одной и той же поглощенной дозе *биологическое* воздействие разных компонентов излучения различно. Для приведения его к общей системе оценки вводят **коэффициент качества излучения** k . Его произведение на поглощенную дозу D называется **эквивалентной дозой** H :

$$H = kD. \quad (11.15)$$

Например у рентгеновского, γ - и β -излучения $k = 1$, у нейтронов с энергией 0,1—10 МэВ $k = 10$, а у α -излучения с энергией до 10 МэВ $k = 20$. Единица эквивалентной дозы — *зиверт* (Зв): 1 Зв соответствует $D = 1$ Гр при $k = 1$. Внесистемная единица эквивалентной дозы — *бэр* (биологический эквивалент рентгена): 1 бэр = 10^{-2} Зв. Такая доза производит то же биологическое действие, что 1 Р. Доза в 1 бэр определяется поглощенной дозой в 1 рад при $k = 1$. Например, естественный радиоактивный фон на территории России примерно 70—200 мбэр/год, при локальных облучениях в онкологии человек получает до 10^3 бэр за три-четыре недели, а для космонавтов предельно допустимая доза за весь период профессиональной деятельности — 400 бэр.

При одновременном действии i разных видов излучения эквивалентная доза определяется суммой

$$H = \sum_i k_i D_i. \quad (11.16)$$

Однако и эта характеристика недостаточно полна: разные органы и ткани человека чувствительны к радиации по-разному. Например, при одинаковой эквивалентной дозе рак легких более вероятен, чем рак щитовидной железы, и т.д. Поэтому вводят еще и **коэффициент радиационного риска**. Его устанавливают опытным путем и рассчитывают так, чтобы сумма его значений для всего организма составляла единицу. Например, для головного мозга, костного мозга и половых желез этот коэффициент составляет 0,025, 0,12 и 0,2 соответственно. Умножив эквивалентную дозу на коэффициенты радиационного риска и просуммировав по органам и тканям, получают **эффективную дозу**, единица измерения которой совпадает с единицей измерения эквивалентной дозы. Например, допустимой нормой

облучения населения считают дозу ≤ 1 мЗв в год, а летальная доза, обозначаемая ЛД_{30/50}, определяет дозу, при которой в результате облучения в течение 30 суток погибнет 50% людей. Для взрослых здоровых лиц мужского пола она находится в пределах 400–500 бэр.

Эффективную и эквивалентную дозы вычисляют, пользуясь дозиметрическими измерениями. В качестве чувствительного элемента дозиметра применяют, в частности, **счетчик Гейгера**. В сущности это газонаполненный заряженный конденсатор, который пробивается при пролете сквозь него ионизирующей частицы. В результате производимой ею *ударной ионизации* образуется лавина электронов и ионов — между электродами возникает импульс тока (газовый разряд). Количество таких импульсов подсчитывается. В зависимости от устройства счетчика и материала его окна он ориентирован на то или иное излучение.

Счетчик Гейгера не может идентифицировать частицы, определять их энергию и регистрировать все γ -кванты, поскольку они слабо взаимодействуют с газом. Этих недостатков лишены **сцинтилляционные счетчики**, основу которых составляют флуоресцирующие вещества (йодистый натрий и др.). Они излучают свет при поглощении частиц разной природы. При одинаковой энергии частицы, вызывающие большую ионизацию (протоны, α -частицы и др.), производят меньше фотонов, чем γ -кванты или β -частицы. В то же время для данного вида частиц число генерируемых ими фотонов примерно пропорционально их энергии, что позволяет определять энергию излучения.

Кванты света, излучаемые флуоресцирующим веществом, принимает ФЭУ, который усиливает импульс фототока в миллионы раз. Он записывается регистрирующей системой, которая подсчитывает число частиц, попадающих на счетчик в единицу времени, и распределение их по энергиям. Быстродействие такого счетчика — $\sim 10^9$ импульсов в секунду, что много больше, чем у счетчика Гейгера.

Идентификацию частиц осуществляют чаще не в оперативной деятельности по защите от оружия массового поражения, а в исследованиях. Для этого применяют, в частности, трековые приборы (см. параграф 6.3).

Резюме

Подводя итоги настоящей главы, отметим ее основные положения.

Атомное ядро представляет собой совокупность протонов и нейтронов, связанных сильным взаимодействием, которое осуществляет их обмен π -мезонами. Нуклоны взаимодействуют также с помощью легких частиц — электронов и нейтрино, что представляет собой слабое взаимодействие. Оба взаимодействия относятся к четырем фундаментальным.

Сильное взаимодействие определяет энергию связи ядра, которая выделяется в процессе спонтанной или наведенной радиоактивности. Изменение во времени числа нераспавшихся ядер определяется законом радиоактивного распада.

В зависимости от коэффициента размножения нейтронов ядерная реакция деления может быть затухающей, самоподдерживающейся или взрывной. Самоподдерживающаяся реакция лежит в основе ядерной энергетики, а взрывная — ядерного оружия. При реакции синтеза выделяется больше

энергии на один нуклон, чем в реакции деления, но реализована она пока только в термоядерном оружии.

Ядерный взрыв реализует ряд поражающих факторов. Наиболее специфичным из них является ионизирующее излучение, воздействие которого на вещество характеризуют дозами излучения, имеющими разный смысл в зависимости от способа определения.

Ядерные реакции широко используют в технике и технологии, а тактическое и стратегическое ядерное оружие определяет обороноспособность государств.

Вопросы для самоконтроля

1. Чему равна энергия связи ядра атома водорода?
2. Какая из частиц и почему требует большей энергии при отрыве от атома ${}^4_2\text{He}$ — нейтрон, электрон или протон?
3. Удельная энергия связи зависит от массового числа. Значит ли это, что у изобар энергии связи одинаковы?
4. Какими причинами обусловлены верхний и нижний пороги энергии, выделяющейся при взрыве атомной бомбы?
5. Как изменяются массовое и зарядовое числа при выбрасывании из ядра: альфа-частицы; протона; нейтрона; позитрона?
6. За время, равное периоду полураспада $T_{1/2}$, количество радионуклида уменьшается вдвое. Значит ли это, что за время $2T_{1/2}$ нераспавшихся радионуклидов не останется вообще?
7. Как изменится кривизна траектории электрона в магнитном поле после прохождения сквозь металлическую фольгу?
8. Какое из ядер изотопов ${}^{35}_{17}\text{Ne}$ и ${}^{37}_{17}\text{Ne}$ получает большее ускорение в электрическом поле?
9. Слой половинного ослабления уменьшает интенсивность параллельного пучка ионизирующего излучения вдвое. Значит ли это, что удвоенный такой слой защищает от него полностью?
10. Какое из ядер изобар ${}^{14}_6\text{C}$ и ${}^{14}_7\text{C}$ при одинаковых кинетических энергиях имеет меньший радиус траектории в магнитном поле?

Задачи с решениями

11.1. Критическая масса боезаряда атомной бомбы на основе урана-235 составляет 48 кг. При делении одного ядра урана высвобождается энергия 200 МэВ. При взрыве успевает прореагировать 15% ядер урана. Найдём его тротильный эквивалент, если при взрыве 1 кг тротила выделяется $4,2 \cdot 10^6$ Дж.

Дано: $m = 48$ кг; $m_1 = 0,15m$; $E_1 = 200$ МэВ = $3,2 \cdot 10^{-11}$ Дж; $E_{1\text{т}} = 4,2 \cdot 10^6$ Дж.

$m_{\text{т}} = ?$

Решение. Энергия взрыва в тротильном эквиваленте определяется выражением $E = nE_1/E_{1\text{т}}$, где n — число прореагировавших ядер, определяемое соотношением

$$n = \frac{m_1 N_0}{A_{\text{U}}} = \frac{0,15m N_0}{A_{\text{U}}},$$

где N_0 — число Авогадро; A_{U} — масса килограмм-атома урана.

Таким образом,

$$m_{\text{т}} = \frac{0,15m N_0 E_1}{A_{\text{U}} E_{1\text{т}}}.$$

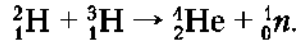
Подставляя данные, получим $m_{\text{т}} = 140$ кг.

11.2. Определим тротиловый эквивалент реакции синтеза 5 г полностью прореагировавшей смеси дейтерия и трития, если при взрыве 1 кг тротила выделяется энергия 4,2 МДж.

Дано: $m = 5 \text{ г} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$; $E_{\text{тр}} = 4,2 \cdot 10^6 \text{ Дж}$.

$m_{\text{T}} - ?$

Решение. Такая реакция протекает по схеме



Смесь прореагировала полностью, потому что соотношение масс дейтерия и трития соответствует соотношению их массовых чисел в реакции: 2 г дейтерия и 3 г трития. По сравнению с исходными продуктами реакции энергия связи возрастает на 17,6 МэВ. Поскольку в реакции принимает участие пять нуклонов, на каждый из них выделяется $E_0 = 3,52 \text{ МэВ/нуклон}$, а общее число нуклонов

$$n = \frac{m_{\text{D}}N_0}{A_{\text{D}}} + \frac{m_{\text{T}}N_0}{A_{\text{T}}},$$

где m_{D} , m_{T} — исходные массы дейтерия и трития; A_{D} , A_{T} — массы килограмм-атома; N_0 — число Авогадро. Соответственно, выделившаяся энергия в тротиловом эквиваленте

$$m_{\text{T}} = \frac{E}{E_{\text{тр}}} = \frac{E_0 N_0}{E_{\text{тр}}} \left(\frac{m_{\text{D}}}{A_{\text{D}}} + \frac{m_{\text{T}}}{A_{\text{T}}} \right).$$

Подставляя данные, получим $m_{\text{T}} = 1,61 \cdot 10^5 \text{ кг} = 161 \text{ т}$.

11.3. Удельная активность радиоуглерода ${}^{14}_6\text{C}$ в пробах дерева, взятых из гробницы фараона Джосера (считают строителем первой пирамиды) в 2010 г., составила 114 Бк/кг. Его начальная активность в живом дереве 255 Бк/кг, а период полураспада 5730 лет. Когда похоронен фараон?

Дано: $T_{1/2} = 5730 \text{ лет}$; $A_0 = 255 \text{ Бк/кг}$; $A_1 = 114 \text{ Бк/кг}$.

$T - ?$

Решение. Активность A радионуклида определяется законом радиоактивного распада:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 \exp\left(-\frac{0,693t}{T_{1/2}}\right),$$

где учтено $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda$. Отсюда

$$\frac{0,693t}{T_{1/2}} = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right), \quad t = \frac{T_{1/2} \ln(A_0/A)}{0,693}.$$

Подставляя данные, получим $t = 6668,5 \text{ лет}$, т.е. дата захоронения: ~ 4658 г. до н.э.

11.4. Вычислим толщину грунтовой обсыпки убежища закрытого типа, имеющего покрытие из деревянных брусьев толщиной 20 см. При мощности дозы γ -излучения 500 мкР/ч убежище должно понизить ее до 20 мкР/ч. Слой половинного ослабления грунта и дерева составляет 12 и 29 см соответственно.

Дано: $l_{\text{дер}} = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$; $P_0 = 500 \text{ мкР/ч}$; $P_1 = 20 \text{ мкР/ч}$; $(L_{1/2})_{\text{гр}} = 12 \text{ см} = 0,12 \text{ м}$; $(L_{1/2})_{\text{дер}} = 29 \text{ см} = 0,29 \text{ м}$.

$l_{\text{гр}} - ?$

Решение. В соответствии с законом Бугера

$$P_1 = P_0 \cdot e^{-\mu_{\text{гр}} \cdot l_{\text{гр}}} \cdot e^{-\mu_{\text{дер}} \cdot l_{\text{дер}}},$$

откуда

$$\frac{P_1}{P_0} = e^{-\mu_{\text{гр}} l_{\text{гр}} - \mu_{\text{дер}} l_{\text{дер}}}, \quad \mu_{\text{гр}} l_{\text{гр}} = \ln \frac{P_0}{P_1} - \mu_{\text{дер}} l_{\text{дер}}$$

Учитывая, что $\mu = 0,693/L_{1/2}$, получим

$$l_{\text{гр}} = \frac{(L_{1/2})_{\text{гр}}}{0,693} \ln \left(\frac{P_0}{P_1} - \frac{0,693}{(L_{1/2})_{\text{дер}}} l_{\text{дер}} \right)$$

Подставляя данные, получим $l_{\text{гр}} = 47$ см.

11.5. Ожог кожи вызывается световым импульсом с поверхностной плотностью энергии $\geq 8,4$ Дж/см². Полагая, что 20% энергии воздушного ядерного взрыва мощностью 50 кт в тротиловом эквиваленте составляет световой импульс, найдем, на каком расстоянии от эпицентра взрыва возможен ожог. При взрыве килограмма тротила выделяется $4,2 \cdot 10^6$ Дж.

Дано: $E_{\text{ож}} = 8,4$ Дж/см² = $8,4 \cdot 10^4$ Дж/м²; $E = 50$ кт = $2,1 \cdot 10^{14}$ Дж; $E_{\text{св}} = 0,2E$.
 R — ?

Решение. Световой импульс имеет в эпицентре взрыва энергию $E_{\text{св}} = 0,2E$. На расстоянии R на единицу площади поверхности приходится

$$E_{\text{пов}} = \frac{0,2E}{4\pi R^2}$$

Исходя из равенства $E_{\text{пов}} = E_{\text{ож}}$, получим

$$R = \sqrt{\frac{0,2E}{4\pi E_{\text{ож}}}}$$

Подставляя данные, получим $R \approx 6,3 \cdot 10^3$ м.

Задачи для самостоятельного решения

11.6. Радиоактивный изотоп $^{216}_{84}\text{Po}$ претерпевает распад по схеме $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$. Какова энергия связи нуклонов в ядре конечного продукта распада?

11.7. Количество атомов радиоактивного изотопа уменьшилось за год втрое. Во сколько раз оно уменьшится за два года?

11.8. Индивидуальный дозиметр представляет собой заряженный до 120 В конденсатор емкостью 12 пФ с объемом камеры 4 см³, в котором находится воздух при нормальных условиях. Какова экспозиционная доза излучения, если напряжение на дозиметре уменьшилось до 60 В?

11.9. Мощность экспозиционной дозы X гамма-излучения на расстоянии $r_1 = 40$ см от точечного источника равна 4,30 мкА/кг. Определите время t , в течение которого можно находиться на расстоянии $r_2 = 6$ м от источника, если предельно допустимую экспозиционную дозу X принять равной 5,16 мкКл/кг. Поглощением γ -излучения в воздухе пренебречь.

11.10. Танковая броня при толщине 95 мм уменьшает интенсивность радиоактивного излучения в 10 раз. Каков коэффициент поглощения брони?

Глава 12

ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

Чем тоньше фильтр, тем больше оседает от протекающего сквозь нас времени.

Вера — пристанище мало- и много-образованных. Остальные обходятся знанием.

В результате изучения данной главы учащийся должен:

знать

- основы развития мышления при построении физической картины мира;
- основания концепции тепловой смерти и инфляционной модели Вселенной;
- основания концепции самоорганизации диссипативных систем;
- основы стандартной модели микромира;

уметь

- приводить примеры самоорганизации микро- и макромира;
- анализировать особенности систематизации составляющих материи;

владеть

- навыками оперирования основными представлениями физической картины мира.
-

12.1. Микро- и макромир

Изучив курс физики, мы получили физическую картину мира (ФКМ), т.е. представление о том, как он устроен, из чего состоит, как связаны и как функционируют его объекты. В чем особенности ФКМ, и в какой мере она нас устраивает? В ней есть две особенности — фрагментарность и непостоянство: она всегда в динамике.

Рассмотрим, например, *фундаментальные* кирпичики мироздания. Фундаментальность означает, что сами кирпичики ни из чего уже не состоят, на части не делятся и друг к другу не сводятся. У древних греков претендентами на эту роль были огонь, воздух, земля и вода. Далее их сменил «атом», пока не выяснилось, что атомов множество, и они разные. Затем и «неделимый» (атом) разделился на нуклоны и электроны, но цепь элементарных частиц на этом не прервалась. К настоящему времени их известно уже ~400, что втрое больше, чем химических элементов в системе Д. И. Менделеева! (По этому поводу высказывалась даже гипотеза о возможности существования мира, структурными единицами которого являются уже не химические элементы, а элементарные частицы.) Что же касается неделимости (элементарности) составляющих материи, то наука выражается те-

перь гораздо осторожней: **элементарная частица** — это микрообъект, который на данном уровне знаний проявляет себя как не имеющий структуры.

Совсем еще недавно считали, что к элементарным частицам относятся *барионы* (от греч. *barys* — тяжелый) протон и нейтрон, *лептоны* (от греч. *leptos* — легкий) электрон и нейтрино, *мезоны* (имеющие среднюю массу) и *фотоны*. «Условно элементарной» можно считать и такую частицу, которая структуру имеет, но *при данных взаимодействиях* ее не проявляет. Это понятие перекликается с понятием «материальная точка» в механике (см. параграф 1.1) или «точечный заряд» в электромагнетизме (см. параграф 5.1).

Второе русло физической мысли было издревле направлено в космос, т.е. в противоположную сторону шкалы размеров. Долгое время космическая картина была статичной: плоская Земля покоилась на трех китах, а над нею простиралась незыблемая твердь неба. Потом Земля обрела округлость и была помещена в центр ФКМ. Далее этот центр сместился к Солнцу, пока и Солнце не оказалось одной из миллиардов звезд на краю одной из миллиардов галактик, причем космос «ожил» — его объекты стали рождаться, осуществлять преобразования и погибать. Поразительно, что человек — эта крохотная «пылинка» в грандиозных космических просторах — проник мыслью не только в их далекие закоулки, но и в историю всей Вселенной.

Ее инфляционная модель восходит к уравнению А. Эйнштейна и его критике (1922 г.) со стороны советского теоретика А. А. Фридмана (1888—1925). Эйнштейн считал, что его уравнение обязано иметь *стационарное* решение, поскольку Вселенная не может изменяться во времени. Фридман же полагал, что вид уравнения должен допускать и *нестационарные* решения — Вселенная расширяется или сжимается, в зависимости от ее массы и стадии развития (Эйнштейн впоследствии с ним согласился).

В 1929 г. американский астрофизик Э. Хаббл (1889—1953), исследуя красное смещение (см. параграф 7.9) спектра звезд, галактик и туманностей, установил закон, согласно которому космические объекты от нас *удаляются*, причем скорость удаления тем больше, чем больше до них расстояние (линейная зависимость). Из такого расширения Вселенной можно было заключить, что в его начале вся материя была сосредоточена в некоей «точке», из которой в результате взрыва она и стала расширяться. К этому выводу пришел бельгийский католический священник и ученый Ж. Леметр (1894—1966), а советско-американский физик Г. А. Гамов (1904—1968) в 1948 г. предложил теорию Большого взрыва. На начальной стадии развития Вселенной в ее очень плотном и горячем веществе происходил синтез легких химических элементов в среде электромагнитного излучения, а при расширении Вселенной ее вещество адиабатно охлаждалось, образуя различные структуры. Впоследствии эта теория была уточнена американским астрофизиком А. Гутом (род. в 1947 г.), советско-американским физиком А. Линде (род. в 1947 г.) и другими учеными. Согласно современным взглядам (инфляционная модель), ~13,8 млрд лет назад из «пузырька» субатомного размера возникло сверхскоростное раздувание пространства, образовавшее пузырь, на поверхности которого Вселенная и находится. Поскольку радиус пузыря огромен, она кажется плоской. А поскольку раздувание продолжается (уже с меньшей скоростью), то все ее компоненты удаляются относительно *любой* из ее звезд или планет, причем по мере удаления от точки на-

блюдения скорость удаления растет. Точно так же удаляются друг от друга ячейки сетки на поверхности раздуваемого воздушного шара.

Горячая плазма, состоявшая из фотонов, электронов, протонов, нейтронов и некоторых других частиц, стала охлаждаться. Из-за связывания свободных электронов в атомы фотоны почти перестали взаимодействовать с материей и стали распространяться свободно. Они существуют до сих пор в виде реликтового излучения. В 1950 г. Г. А. Гамов оценил его температуру в ~ 3 К, а в 1965 г. американские астрофизики А. Пензиас и Р. Уилсон экспериментально подтвердили и уточнили эту оценку — $\sim 2,7$ К (Нобелевская премия 1978 г.).

Что касается частиц, то неравномерность их плотности породила конгломераты, из которых образовались звезды, галактики, туманности и т.д. Примерно 4,5 млрд лет назад заработала тепловая машина под названием «Земля». Ее нагревателем стало горячее Солнце, а холодильником — реликтовое излучение, в которое погружена материя Вселенной (см. параграф 4.8). Это позволило ей осуществлять работу по формированию разнообразных структур — вплоть до органической жизни, увенчанной человеческим мышлением.

Как видим, картина микро- и макромира весьма серьезно изменилась за каких-то несколько тысячелетий. За это мгновение (по сравнению с возрастом Вселенной и даже Земли) сам мир изменений не претерпел — изменилась лишь его физическая картина, рисуемая мозгом: именно мышление человека — источник динамики ФКМ и нашей деятельности на ее основе.

Фрагментарность и динамика ФКМ просматриваются и в тексте учебника. Он иллюстрирует не только то, *о чем* нужно мыслить, но и *как* нужно мыслить. Он показывает не только *итоги* физической мысли, но и само ее *движение*.

ФКМ так же неотделима от мышления человека, как и натюрморт от видения и инструментов художника. Рисующий ФКМ человек должен знать инструмент, которым пользуется, чтобы понять, как получены те или иные достижения физики, и предвидеть стратегию будущих открытий. Точно так же физическая теория не только объясняет наблюдаемые факты, но и предсказывает новые.

12.2. Базис физической картины мира

Для определения плотности нужны измерители массы и объема, для определения длины волны нужна дифракционная решетка, а для определения ФКМ нужно мышление. Это аппарат, особенности которого коренятся в его происхождении и развитии.

Сегодняшняя ФКМ возникла через ее промежуточные «эскизы». Они важны по той же причине, по какой действие дифракционной решетки определяется дифракцией на отдельной щели (см. параграф 8.4). Решетка создает интерференцию волн, дифрагировавших на множестве щелей. Она дает более полную и тонкую физическую картину излучения, чем одна щель, но *принципы* работы решетки следуют из дифракции на щели. Точно так же важно понимать тот базис, на котором строится ФКМ.

Свои «щели» и «решетки» имеет все живое: они жизненно необходимы для взаимодействия со средой обитания. Пример ранних обитателей плане-

ты — цианобионты. Они образуют пленки на поверхности воды в гидротермальных источниках Камчатки, условия которых близки к первичной среде Земли. В опытах исследователей фрагмент такой пленки растирали в ступке и помещали в освещаемую чашку Петри с питательной средой. Через некоторое время из неповрежденных фрагментов пленки в сторону соседних фрагментов выползали связующие нити. В результате через сутки восстанавливалась целостная пленка, только теперь ее форма и размер были лучше приспособлены к новым условиям, т.е. к поглощению света от лабораторного источника и сопротивлению на разрыв.

Вирус организован более сложно, а его жизнь зависит от анализа клеточных мембран (плазматическое ограждение клетки). Если мембрана содержит нужный блок, то вирус прилепится, проникнет сквозь нее и перепрограммирует клетку под свои цели.

В программе построения млекопитающего генетически аккумуляирован разнообразный предшествующий опыт выживания. При этом *сформированный* организм не только опирается на генетическую базу, но и ориентирован на предстоящую корректировку и дополнение ФКМ под воздействием сигналов среды, поскольку условия его жизни жестко не детерминированы. Этот процесс можно характеризовать в терминах общих правил работы автоматизированной системы управления (АСУ): захват, селекция и переработка информации; выработка и осуществление решений; контроль их исполнения по цепи обратной связи; внесение поправок в оценку реальности и собственное поведение.

Животное принимает информацию с потоками звуковых и электромагнитных волн с помощью рецепторов (датчиков). Например, грубым датчиком электромагнитных волн является кожа, реагирующая на энергию излучения (см. параграф 9.1). Глаз дифференцирует информацию гораздо более тонко, но в гораздо более узкой полосе частот. Глаз — это биофизическая линза (см. параграф 8.5) с диафрагмой (зрачком), образованной радужной оболочкой. Он проецирует изображение объекта на слой светочувствительных клеток на сосудистой «подкладке» (сетчатка), расположенный в фокальной плоскости линзы. При близорукости или дальнозоркости фокальная плоскость не совпадает с сетчаткой, и для восстановления четкости изображения человек применяет искусственные линзы. К ним прибегают и тогда, когда необходимо расширить возможности глаза в область макро- или микромира. Сформированное на сетчатке изображение в виде электрических импульсов передается в специализированный зрительный отдел коры головного мозга по зрительному нерву, который аналогичен многожильному кабелю. Датчики, вживленные в мозг кошки, показали, что там формируется то же самое изображение, что и на сетчатке¹.

Мозг обрабатывает и обогащает информацию, поступающую от датчиков, распознает возникшие образы, сопоставляет их с заложенным в памяти сегментом ФКМ и включает алгоритмы решения жизненных задач.

Таким образом, *физическая* система организма в результате *физических* взаимодействий со средой усложняется путем накопления информации и алгоритмов ее обработки. При этом познавательные процессы мышления

¹ URL: http://gazeta.zn.ua/SCIENCE/vidim_mir_glazami_koshki.html; Кошачий глаз. Рубрика Новости // Компьютерра. 1999. 26 октября. № 43 (321). С. 8.

к конкретно-физическим уже не сводятся — мысль (вообще информация) может существовать вне ее материального носителя: носитель — это *внешний фактор*. Одна и та же информация может быть записана модулированной волной, ориентацией доменов магнитного диска, зарядами барабана ксерокса, связями нейронов мозга и т.д.

У социальных животных, к которым относится и *Homo sapiens*, генетические «заготовки» взаимодействия с внешним миром доводятся до видового стереотипа не только индивидуальным опытом, но и социальным обучением, без которого большинство животных нежизнеспособно. Основа социальной коммуникации — это игры, подражание и язык¹. Они позволяют дополнить генетическую информацию той, что накопилась во всей культуре вида. При обучении подражанием работают язык тела (движения, мимика, взгляды) и язык звуков. Каждый знак языка символизирует (кодирует) элемент восприятия, эмоции, намерения или представления, а комбинации знаков — это те смысловые структуры, которые определяют операции мышления в быту, познавательной и профессиональной деятельности. Мозг без языка — это только биомасса, как компьютер без кодов программ — это груда железа. Владелец мозга, выключенного из языка, как активная социальная единица не существует.

Язык, интеллект и, соответственно, ФКМ социальных видов животных остаются в основном неизменными, в соответствии с однообразным, замкнутым из поколения в поколение жизненным циклом. Преодолеть эту инерцию может дрессировка. В принципе животные способны усвоить множество неизвестных им ранее символов и соответствующих реакций, но органичной потребности в этом не испытывают. Поэтому при снятии дополнительного кормления и других биологических стимулов результаты межвидового обучения исчезают — цепь передачи подобного опыта обрывается. Тем не менее сама способность животных к декодированию новой информации свидетельствует, что человеческие средства построения ФКМ имеют серьезную эволюционную базу.

12.3. Теоретическое мышление

В отличие от других видов *Homo sapiens* разорвал замкнутый стереотип взаимодействия со средой. Почему это случилось, остается тайной, но природное любопытство побудило его вникать во все более тонкие составляющие сигналов среды и, соответственно, изменять поведение, что позволяло улучшать условия существования вида. Объем динамической информации, воспринимаемой человеком, нарастал, его опыт накапливался, структурировался и преобразовывался в пластичные нейронные связи мозга и соответствующие языковые единицы мышления. Любопытство продолжало и продолжает уводить человека все дальше от того чувственного восприятия среды, которое было сформировано сотнями тысяч лет предшествующей эволюции. Цели человека расширялись вслед за расширением его познавательных возможностей, и наоборот — реализация целей побужда-

¹ Резникова Ж. И. Истоки когнитивного поведения животных // Когнитивные исследования. Проблема развития. Сборник научных трудов. М. : Институт психологии РАН, 2009. Вып. 3. С. 115–152.

ла к новому знанию (та же взаимозависимость действует при обучении). На этой базе человек создает *искусственную* среду — из *объекта* развития Вселенной он превратился в ее *субъект* — в партнера природы по усложнению материального мира. Такие явления, существенно ускоряющие процессы развития, в науке и технике называют **положительной обратной связью**.

На начальных этапах формирования ФКМ связи между объектами природы просматривались плохо, в их поведении человек усматривал умыслы (как это делают дети и сейчас) и вмешательство богов. Отсюда и всевозможные мифы. Смену дня и ночи, например, древние египтяне убедительно объясняли окончанием лодочного путешествия бога Ра (бога солнца) по небесной реке. Древние греки увязали гипотезу простых атомов и сложность вещей побуждениями самих атомов: они стремятся к соединениям и способны испытывать от этого эмоции. Что касается мышления, то, по мнению некоторых психологов, до X—VIII вв. до н.э. человек плохо осознавал свое «Я» из-за неразвитого взаимодействия полушарий мозга. Формируемые в мозгу слова он воспринимал как голоса богов (см. древние эпосы). Но хотя собственные мысли считались не вполне собственными, им следовали — богов, как и старших, нужно слушаться: от них исходит руководство к выживанию.

Важнейшим этапом формирования ФКМ стало появление *теоретического* мышления, способного выйти за пределы непосредственного чувственного восприятия. В древнем мире это было сложно, так как человек был жестко привязан к своей однообразной социальной функции: земледелец, плотник и т.п. Одна из гипотез отрыва от нее относится к древнему Критскому царству (бронзовый век)¹.

Навыки передавались в основном тем же методом, что и у животных, а при подражании думать некогда, незачем и даже вредно, ибо ведет к сбоям (по этим причинам метод «*делай, как я*» практикуется и *сегодня* в некоторых армейских подразделениях). Подражание базируется на языке звуков, жестов, мимики и телодвижений, а навыки закрепляются в подсознании и управляют поведением на уровне инстинктов — дыхание или ходьба (как и работа на современном конвейере) осмысления не требуют. Навык отца передавался старшему наследнику (на всех не хватало ресурсов), а «лишних людей» «обобществляли», в частности на флоте, состоящем из 50-весельных кораблей (пентеконтера). В процессе завоевания новых земель капитану корабля приходилось проигрывать набег *мысленно* — подражать некому. Манипулируя условными (знаковыми) формами объектов, он был вынужден оценивать варианты решения с учетом возможностей корабля, экипажа и наличия ресурсов. Именно это мы делаем, решая физико-технические, военно-тактические и прочие задачи: рисуем эскиз, думаем о ресурсах (необходимых данных), привлекаем алгоритмы решения в виде формул и т.д.

По привязке к месту и времени гипотеза М. К. Петрова уязвима для критики. Судя по памятникам древних культур Южной Америки, Китая, Вавилона, Египта и др., теоретическое мышление появилось задолго до Критского царства. Кроме того, его элементы возникают в том числе и при

¹ Петров М. К. Пентеконтера. В первом классе европейской школы мысли // Вопросы истории естествознания и техники. 1987. № 3. С. 100—109.

копировании действий наставника. В той мере, в какой оно сопровождается мыслями, может возникнуть и творческая модернизация. Плуг лучше загнуть, гвоздь необязательно забивать тремя ударами, бревно при распиле нужно фиксировать, чтобы не каталось, и т.д. Тем не менее мысль о том, что к теоретическому мышлению приводят изменения стереотипов социального поведения, представляется правильной. Гипотеза Петрова верна и в том отношении, что именно *военная* направленность развития издревле была наиболее плодотворной...

Тсорстическое мышление древних греков несколько потеснило их богов — человек обрел элементы *самосознания*. Уже в IV в. до н.э. Аристотель не только *полагался* на собственное мышление, но и стремился его *упорядочить* аксиоматическим методом: всякая мысль требует основания, которое также на чем-то основано. В начале такой цепи находится *базовое* основание, которое либо не нуждается в доказательствах, либо найти их в данный момент невозможно. Выбор таких *аксиом* был поначалу ограничен их *интуитивной ясностью*. Кто, например, возразит, что «целое больше своей части»? Далее мысль обязана руководствоваться правилами рассуждения (логикой), которые ведут ее от одного утверждения к другому. Так строятся гипотезы и теории, без которых наука и, соответственно, цивилизация не развиваются: теория не только *объясняет* наблюдаемое, но и открывает *новые перспективы*. Примером может служить аксиоматическая геометрия Евклида (современника Аристотеля): она свидетельствует о доказуемости умозаключений, построенных на дедукции.

Теоретическое увязывание объектов и явлений в голове одновременно свидетельствовало и об упорядоченности самого мира. В Средние века это стали подтверждать *экспериментально*, что позволило И. Ньютону сформулировать *общий метод* физического исследования, который актуален и в наше время: на основе экспериментов выявляются общие закономерности, на их основе строятся законы, из законов выводят следствия и проверяют их опытным путем. Такой метод иллюстрирует и учебник физики.

В «Правилах философских умозаключений» Ньютон предлагает считать законы верными до тех пор, пока не обнаружат явления, которые их либо уточняют, либо опровергнут. С тех пор опровержения следовали одно за другим, в том числе в отношении законов самого Ньютона. Наиболее яркие из них составили суть европейских научных революций конца XIX — XX вв., а также конца XX — начала XXI вв., где они приобрели уже международный характер. Революции пересматривали самые основы физики, а сопротивление им (изначально обоснованное Ньютоном) было столь же сильным, что и в природе при естественном отборе мутаций. Носители новых взглядов были обязаны доказывать их жизнестойкость и конкурентоспособность. В той мере, в какой это удавалось, результат превосходил все ожидания. Человек вышел за пределы частот электромагнитных волн, воспринимаемых глазом, и стал «видеть» в диапазоне от радиоволн до рентгеновских и гамма-лучей. Размеры тел, доступные его наблюдению, вышли далеко за те, соизмеримые с его телом, размеры, с которыми имел дело его пращур: он «видит», с одной стороны, элементарные частицы, а с другой — всю Вселенную до пределов ее реликтового излучения. Он фиксирует гравитационные волны и скорости далеко за пределами скоростей животных и птиц, на ко-

торых охотился в древности: с одной стороны, он измеряет скорость раздвижения материков, с другой — может измерить скорость света.

Таковы причины и особенности *динамики* ФКМ. Обсудим теперь тот факт, что мы видим не *целостную* картину, а лишь отдельные ее разделы (фрагменты).

Принято считать, что только в древности объектов мышления было немного и потому «любомудрие» (философия) способно было охватить *все* знание. Далее оно набрало, подобно урану, критическую массу, в результате чего знание разорвалось на отдельные науки, а затем такая же участь постигла каждую их них. Поэтому физики, занимающиеся, например, твердым телом и плазмой, плохо понимают друг друга. Однако если взгляд сфокусировать определенным образом, то можно убедиться, что «прорывы» в построении ФКМ ведут не только к ее дроблению, но и к диалектической противоположности — интеграции знаний. Она происходит благодаря изменениям в самом *стиле* физического мышления. Чтобы это увидеть, сгруппируем некоторые открытия около таких понятий, как «разграниченное», «противоположное», «несовместимое», «непредставимое» и т.п.

12.4. Объединение разрозненного

Первичные физические знания базировались на присущих нашему виду органах чувств, «базе данных», «операционных системах» головного мозга и механических возможностях тела. Их происхождение диктовалось средой обитания вида — у муравьиной семьи, дельфина или внеземного разума ФКМ иные, причем они имеют не меньшее право на существование. Наше мышление ограничено тем, что способно оперировать лишь несколькими объектами одновременно. Дробление физической реальности происходит также вследствие разделения каналов приема и обработки звуковых и электромагнитных волн и ограничения диапазонов частот, доступных восприятию. Если, например, вы глубоко вникаете в музыку или стихи, то сопутствующий им видеоряд будет только мешать.

Пространственное и временное разделение объектов, их «противоположность» или «несовместимость» сохранялись и в том случае, когда между ними устанавливали связи. Например, силы взаимодействия объектов вносили в аналитический аппарат соответствующего фрагмента ФКМ, но на уровне Ньютона и Кулона тела по-прежнему рассматривались отдельно друг от друга и от вызываемых ими сил. Однако эта ограниченность стала стираться по мере проникновения в природу сил. Выяснилось, например, что рассматриваемые в *механике* силы упругости и трения имеют *электромагнитную* природу, а само электромагнитное взаимодействие оказалось процессом обмена зарядами фотонами. При этом сами заряды рассматриваются уже как принадлежность и особенность квантового электромагнитного поля. Другой пример — сильное взаимодействие, представляющее собой обмен пионами. При этом *различные* нуклоны — протон и нейтрон — оказались разными состояниями *одной и той же* (1) частицы.

Птолемея система мира была основана на тезисе Аристотеля о противоположности земного и небесного. В течение многих веков ее убедительно оправдывала человеческая интуиция. Когда же Копернику удалось выйти за привычные рамки и перейти в другую систему отсчета, эта противополо-

ложность исчезла, а интуитивная убежденность получила иные основания (см. параграф 1.1).

Еще более длительное время сохранялась противоположность и несовместимость понятий «одновременность» и «неодновременность» событий. Эйнштейн показал, что они вполне могут сосуществовать, а такие, казалось бы, принципиально разные понятия, как «пространство» и «время», на самом деле составляют единство (см. параграф 1.2). То же можно сказать о дуализме, совместившем столь разные понятия, как «частица» и «волна» (см. гл. 9).

Весьма поучительна в истории научного мышления «противоположность» понятий «точное» и «вероятное». В значительной степени оно было девальвировано уже в молекулярно-кинетической теории, установившей, что молекулярный хаос порождает весьма точные характеристики системы (см. параграф 4.1). Что касается квантовой механики, то она разрушила противопоставление «вероятного» и «точного» в ином, новом смысле. В пределах классического (механического) детерминизма, задав начальные условия системы (причина), всегда можно было установить ее состояние в любой последующий момент времени (следствие) (см. параграф 1.3). В квантовых системах причинно-следственная связь коренным образом меняется: здесь можно определять лишь *вероятность* пребывания частицы *где-то в пределах размытой области*. Первое время казалось, что это усугубило пропасть между «точным» и «вероятным». Однако постепенно выяснилось, что детерминизм не исчез, а лишь изменил *форму* — причинно-следственная связь устанавливается здесь между *начальными* и *конечными значениями функции ψ* . При этом по сути эта связь оказывается даже точнее, чем в механических системах! Например, при анализе траектории электрона в ЭЛТ (макромир) мы видим, что вовсе не квантовая, а именно классическая механика оперирует лишь приблизительными, усредненными значениями координат и импульсов (см. параграф 9.7). В макросистемах это значения не имеет, так как разброс характеристик пренебрежимо мал, но он *существует*, и именно квантовая механика позволила это установить и пользоваться более точными расчетами, учитывающими такой разброс.

Это приучает к тому, что мы живем в вероятностном мире. Как следует из всего нашего опыта, и на макро-, и на микроуровне он устойчив и позволяет получать о себе вполне достоверные сведения.

12.5. Расширение поля зрения

Объекты, которые мышление исследователя способно удерживать одновременно, лежат в русле его поиска. Однако история физики свидетельствует и о плодотворных «сбоях» такой направленности: *второстепенные* детали, лежащие вне этого русла, могут способствовать целостности формируемой ФКМ. Если они вызывают удивление, то *развитое* мышление невольно их захватывает — они переключают внимание, а порой даже оказываются главными. Вот несколько примеров, где «второстепенность» привела к открытиям нобелевского (!) уровня.

Первичным толчком к Нобелевской премии А. Беккереля и супругов Кюри была фотопластинка, случайно засвеченная радиоактивным препаратом (см. параграф 11.2). Такая же случайность вознаградила К. Дэвиссона и Л. Джерме-

ра. Они обнаружили волновые свойства частиц в результате аварии, приведшей к тому, что никель стал монокристаллическим, т.е. превратился в объемную решетку, на которой дифрагировали электроны (см. параграф 9.5). Таким же образом произошло открытие реликтового излучения (см. параграф 12.1). А. Пензиас и Р. Уилсон вовсе его не искали и совершенно случайно обнаружили микроволновый фон, интенсивность которого оставалась постоянной независимо от направления наблюдений и времени суток.

Особенно интересно соотношение былой второстепенности и последующей значимости полупроводников (см. параграф 10.7). Все, что «полу-», функционирует плохо (вспомним пушкинское «полумилорд, полукупец...»). Полупроводники плохо проводят ток, плохо изолируют его, и эти плохие характеристики плохи еще и своей нестабильностью — они зависят от примесей, температуры, освещенности, давления, радиации и т.д. Наконец, из таких полупроводников, как кремний, состоит значительная часть природы, а легкодоступное представляется обычно второстепенным. Во что это «второстепенное» теперь превратилось, общеизвестно.

12.6. Преодоление инерции понятий

Важнейшую роль в построении ФКМ играет язык, являющийся формой работы и проявлений сознания. Поэтому инертность, консерватизм выраженных языком понятий препятствуют их увязыванию при построении целостной ФКМ. Пример — понятие «вакуум». В буквальном переводе с латинского и по общепринятым представлениям вакуум — это пустое пространство вне вещества. Однако представление о пустоте подводит порой мышление: если в освобожденную от бензина, т.е. «пустую», бочку бросить спичку, то *пустота* проявит себя во *всей полноте*. Нечто подобное произошло и в физике.

Для электрона с массой покоя m_e из формулы (2.43) следует $E = \sqrt{c^2 p^2 + m_e^2 c^4}$. Отсюда при $p = 0$ $E = \pm m_e c^2$, а при $p \neq 0$ получаем значения $E > +m_e c^2$ и $E < -m_e c^2$. Они образуют спектр энергий, напоминающий зонную диаграмму твердого тела с запрещенной зоной шириной $2m_e c^2$ (рис. 12.1). Это верно формально-математически, но *физически* отрицательные значения энергии электрона выглядели нереально — такие решения обычно отбрасывают. Английский физик П. Дирак этого не сделал. Он предположил, что верхняя зона соответствует той, привычной, реальности, в которой находимся мы (т.е. частицы, из которых мы состоим), а также наблюдаемые нами частицы, например обычные электроны.

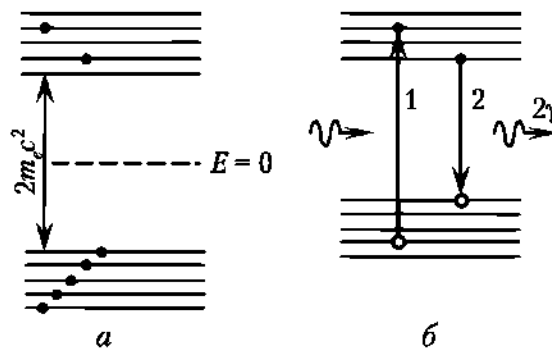


Рис. 12.1

Нижняя зона — это вакуум. Он не только не «пуст», но, наоборот, «переполнен» частицами, а не проявляют они себя лишь по той причине, что все энергетические уровни там заполнены (точно так же не проявляют себя электроны в заполненной валентной зоне диэлектрика). Верхняя же зона (известный нам мир) почти свободна, и потому электрон легко может в ней перемещаться, проявляя себя для нас. Для того чтобы он попал в нее *из вакуума*, ему нужно сообщить энергию $\geq 2m_e c^2 = 1,02$ МэВ, которая лежит в диапазоне энергий γ -квантов. В этом случае электрон из зоны с отрицательной энергией перейдет в зону с положительной энергией, оставив в нижней зоне дырку, т.е. дефицит отрицательного электрона, который есть позитрон — положительно заряженный электрон (переход 1 на рис. 12.1, б).

Эта революционная гипотеза (Нобелевская премия 1933 г.), схема которой напоминает механизм проводимости полупроводников (см. параграф 10.7), была затем подтверждена американским физиком К. Андерсоном в 1932 г. Он действительно обнаружил позитроны (β_+) в космических лучах, *проходящих через вещество* (Нобелевская премия 1936 г.). Наличие вещества здесь важно потому, что импульс исходного γ -кванта больше, чем суммарный импульс возникающей электрон-позитронной пары: для сохранения импульса поблизости должна быть частица, уносящая его избыток.

Кроме описанного процесса возможен и обратный, т.е. воссоединение электрона с позитроном, приводящее к их превращению в излучение: $\beta_- + \beta_+ \rightarrow 2\gamma$ (переход 2 на рис. 12.1, б). Это явление, аналогичное рекомбинации электрона и дырки в полупроводниках, названо **аннигиляцией**. Рождение *двух* γ -квантов, а не одного, обусловлено тем же законом сохранения импульса, требующим разнести импульсы квантов в разные стороны, чтобы импульс системы оставался прежним (нулевым).

Частицу, которая во всех отношениях составляет пару обычной частице, но имеет противоположный заряд, называют **античастицей**. Античастицы найдены не только для электрона, что свидетельствует о существовании в природе *зарядовой симметрии*. Мы живем в мире, состоящем из частиц, — античастицы весьма редки, но их можно получать искусственно. В 1955 г. был получен антипротон (Беркли, США), а в 1995 г. — даже целый атом — антиводород (ЦЕРН, Швейцария). Возможно, где-то существуют симметричные нашему миру иные миры, состоящие из антивещества, атомы которого содержат ядра из антипротонов и антинейтронов, а оболочки — из позитронов.

Таким образом, в представления и аппарат физики была введена новая сущность — античастицы. Такая симметрия придавала бóльшую целостность ФКМ.

Весьма масштабным оказалось преодоление инерции и одного из следствий второго закона термодинамики, которое выходит далеко за рамки физики и выглядит, мягко выражаясь, пессимистично: всякая упорядоченность исчезнет. При таких перспективах становится бессмысленной и конструктивная деятельность человека. Поскольку любые системы стремятся к хаосу теплового равновесия (максимуму энтропии), то это ожидает и всю совокупность систем, т.е. Вселенную. К такому выводу в 1852 г. пришел У. Томсон (лорд Кельвин), а затем его поддержал Р. Клаузиус: звезды остынут, в замирающем молекулярном хаосе любая жизнь прекратится —

Вселенную ждет **тепловая смерть**. Тем самым авторы концепции перечеркнули и возможность возникновения человеческой цивилизации, в том числе собственное рождение, приведшее к этим разрушительным мыслям. Тем не менее возразить им было нечего — концепция тепловой смерти базировалась на реально существующих диссипативных процессах (диффузии, теплопроводности, вязкости) и уравнениях переноса, которые адекватно их описывали и подтверждались практикой.

Возражение Л. Больцмана опиралось на статистический характер второго закона термодинамики: статистика предполагает флуктуации, которые могут быть направлены в *разные* стороны, в том числе в сторону упорядочения материи. Однако этот аргумент убедительным не выглядел. Несмотря на флуктуации, многовековые наблюдения свидетельствуют, что диссипативные процессы ведут именно в сторону более вероятных состояний. Не бывает, чтобы разлитая и растекшаяся вода сама собой собралась обратно в бутылку, памятник сам собой восстановился и т.д. — время течет в направлении хаотизации.

Гипотеза тепловой смерти нанесла ощутимый удар по целостности ФКМ. Не только ее детали, но и Вселенная в целом оказалась хрупким образованием, каким-то чудом сохранившимся до вынесения этого смертного приговора.

12.7. Самоорганизация

Концепция тепловой смерти не может быть верна хотя бы потому, что вселенский хаос уже был 13,8 млрд лет назад, но именно из него родилась вся наблюдаемая сегодня упорядоченность. Такие процессы можно наблюдать и на Земле. Например, за телом, быстро движущимся в воздухе или жидкости, возникают кольцевые вихри (см. параграф 4.5), отличающиеся от исходного молекулярного хаоса *относительной упорядоченностью*. Появляется она и при нагревании дна плоского стеклянного сосуда с жидкостью. Поскольку плотность нижних слоев уменьшается вследствие теплового объемного расширения, они всплывают в виде относительно упорядоченных конвекционных потоков. Иногда (при малой высоте стеклянного сосуда) упорядоченность становится весьма впечатляющей: потоки жидкости принимают вид так называемых ячеек Бенара. Их поперечное сечение (вид сверху на рис. 12.2, *а*) напоминает пчелиные соты, а взгляд сбоку (рис. 12.2, *б*) выявляет, что внутри ячейки жидкость поднимается, а по краям опускается.

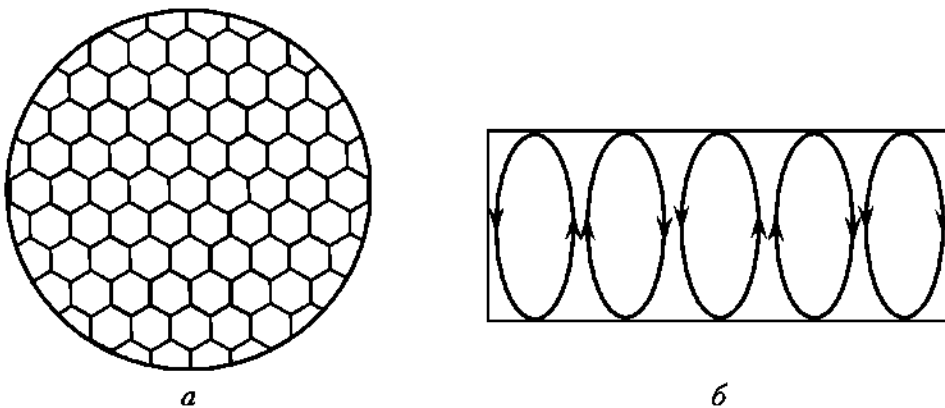


Рис. 12.2

Если в газе при критической температуре образовалась капля жидкости, то *весь* газ сразу превращается в жидкость, словно информация об этой капле мгновенно разнеслась по его объему. Достаточно появиться какому-то центру, «затравке», как процесс охватывает все вещество, — происходит *кооперация* (когерентное поведение) огромного количества частиц. Яркие проявления такой кооперации возникают в активной среде лазера (см. параграф 10.1) или в химической реакции Белоусова — Жаботинского, которая подобно «химическим часам» поддерживает точный период чередования голубого и розового цветов, что свидетельствует об избытке одного из реагирующих веществ.

Поскольку химические реакции лежат в основе биологических процессов, то и на их примитивном уровне наблюдается когерентное поведение.

Существует вид спор, которые прорастают в виде подвижных амёб (коллективные амёбы). Они *хаотично* распределяются в среде обитания и питаются бактериями. Однако когда пища иссякает, концентрация амёб в среде преобразуется в удивительную форму концентрических волн, сходящихся к некоему центру с периодом в несколько минут. Причина в том, что каждая амёба выделяет регулятор гормона цАМФ, концентрация которого в среде их обитания флуктуирует в соответствии с флуктуирующей концентрацией самих амёб. Амёбы движутся туда, где его *случайно* оказалось больше, а поскольку выделяют его и сами, то перепад концентрации цАМФ нарастает: флуктуация не рассеивается, как в диссипативной среде, а развивается! То же происходит у термитов при выборе места постройки гнезда и т.д.

Отсутствие научного интереса к подобным явлениям научного обоснования не имело, а объяснялось тем, что такие системы не поддавались количественному анализу. Причина в том, что в отличие от *линейных* уравнений переноса они описываются *нелинейными* уравнениями, а даже такой выдающийся математик, как Дж. фон Нейман, считал, что содержательная теория нелинейных систем построена быть не может. В то же время невнимание к таким явлениям содержало серьезное противоречие. Большие перепады плотности вещества, его температуры или направленного импульса (см. параграф 4.4), которые описываются нелинейными уравнениями, встречаются в природе гораздо чаще, чем малые. Инертность подхода, предлагающего изучать доступное и игнорировать недоступное, была сродни той, что предлагает искать потерянное под фонарем (поскольку там светлее).

В последние десятилетия нелинейные уравнения научились все же решать, и их решения свидетельствовали, что диссипативные процессы могут приводить не только к хаосу, но и к упорядоченности! Это привело бельгийского и американского физика и химика (выходца из России) И. Пригожина (1917—2003) к открытию самоорганизации материи, направленной, как следует из названия, противоположно ее хаотизации (Нобелевская премия 1977 г.). Наука, изучающая нелинейные неравновесные системы, называется **синергетикой**. В переводе с греческого этот термин, введенный немецким физиком Г. Хакеном, означает «содействие», «сотрудничество» (имеются в виду согласованные действия элементов системы).

Пригожин и его школа вычленили основные факторы, приводящие сложную диссипативную систему к упорядоченности. Она должна быть нелинейной, открытой для обмена веществом, энергией или информацией

и находиться в состоянии, далеком от равновесия. Тогда ее главные характеристики, которые называются **параметрами порядка**, могут принимать *критические значения*. В таких состояниях система становится чувствительной к малейшим флуктуациям, которые могут привести ее к резкому переходу в одно из новых возможных состояний. К какому именно, зачастую неизвестно, поэтому такой переход называют **бифуркацией** (от лат. *bifurcus* — раздвоенный), имея в виду раздвоение траектории развития системы. Для иллюстрации представим себе металлический шарик, помещенный в положение неустойчивого равновесия на вершине другого шара. По какой именно траектории он скатится, предсказать невозможно.

Таким образом, флуктуации, которые Л. Больцман противопоставлял неуклонному росту энтропии и тепловой смерти Вселенной, действительно могут играть важную роль, но только *в новом смысле и в особых условиях*.

В качестве примера можно привести закаленное стекло, которое выдерживает удары молотка, но рассыпается от легкого удара в критическую точку. Такие точки подобны точкам акупунктуры, через которые можно эффективно воздействовать на сложный человеческий организм.

В результате бифуркации огромное количество разрозненных элементов системы внезапно кооперируется и образует тот или иной **аттрактор**. Так называют притягивающее множество — более или менее стационарное состояние, к которому сходятся разные траектории развития системы. Аттрактор может быть периодическим или более сложным: ячейки Бенара, спиральные галактики и т.д. Самоорганизация свойственна активным средам самой разной природы. Ей подвержены не только физико-химические системы, но и явления экономики, поведение людей в толпе, сердечный ритм и даже мышление. Когда творческое напряжение выводит мозг в неустойчивое состояние, малейшая флуктуация может привести его к новой мысли или образу [1, 2, 14].

Таким образом, самоорганизация материи достроила ФКМ компонентом, «симметричным» по отношению к хаотизации. Тем самым ФКМ приобрела некую равновесную целостность.

12.8. Эволюция материи

Тенденцию к усложнению структур материи можно выявить уже на примере формирования простейшего атома. Сближение электрона с протоном под действием кулоновской силы (см. параграф 5.1) *однозначно* определяет их *непрерывно* изменяющиеся координаты, импульсы и энергию (кинетическую и потенциальную). Однако расстояние $\sim 10^{-10}$ м оказывается критическим, и поведение частиц меняется кардинально: они объединяются в атом, где ни о каких траекториях говорить уже нельзя. Относительное положение частиц определяется здесь *неоднозначно* (вероятностными законами), а энергия изменяется *скачкообразно* и только под действием извне (см. параграф 9.7).

Такой скачкообразный переход системы к новому состоянию весьма напоминает бифуркацию, а в качестве самоорганизующейся материи здесь выступает совокупность квантов электромагнитного поля. Важно, что система частиц резко усложняется (ее энтропия уменьшается) (см. параграф 4.8), но глубинная *причина* этого качественного скачка остается от нас скрытой.

Ш. Кулон, М. Фарадей, Дж. Максвелл, А. Эйнштейн, М. Планк, Н. Бор, В. Паули и другие выдающиеся физики шаг за шагом выявляли лишь *следствия* в виде очередных «законов природы».

Одна из попыток сформулировать первопричину усложнения материи была основана на констатации *самого факта* образования атома водорода и более сложных структур. Атом водорода стабилен потому, что сумма масс протона и электрона меньше, чем масса свободного нейтрона. И вообще, если бы соотношения масс элементарных частиц, а также константы фундаментальных взаимодействий отличались от существующих хотя бы на ничтожные величины, не было бы ни атомов, ни молекул, ни, соответственно, разумной жизни. Такая точная «подгонка» физических констант побудила английского физика Б. Картера (были и предшественники) выдвинуть в 1973 г. так называемый *антропный принцип*, идея которого ставит в качестве цели развития Вселенной появление человека-наблюдателя. Подобно этому сам человек некогда ставил в центр Вселенной планету Земля. Однако обнаружено немало и других планетных систем, где могут существовать иные разумы, — их «наблюдения» и соответствующая ФКМ зависят от специфики существующих там видов.

Возникает и иное возражение. Для реализации «замысла о наблюдателе» задавать одни лишь характеристики составляющих материи недостаточно, как недостаточно задать характеристики кирпичей, цемента, оконных блоков и т.д. для реализации замысла о дворце, — нужны еще и проект, и программа сборки, без которых материальные составляющие смысла не имеют. Это вызывает вопрос, девальвирующий цену антропного принципа: где именно содержится такая программа, например, при встрече электрона с протоном? В структурах самих частиц она не выявлена, а вопрос о ее существовании где-то вне материи выходит за рамки науки.

Тем не менее сам факт структурного усложнения материи на базе фундаментальных взаимодействий очевиден. В рассмотренном примере это электромагнитное взаимодействие, но важную роль играют и другие взаимодействия, например гравитационное (см. подпараграф 1.4.3). Уже с первых минут формирования Вселенной оно приводит к образованию гигантских сгустков, где энергия тяготения в процессе стягивания материи в меньший объем преобразуется в тепловую и возникает сильное взаимодействие — термоядерная реакция, в процессе которой ядра водорода синтезируются в ядра гелия (см. параграф 11.5).

На следующем этапе из-за выгорания «топлива» центростремительные силы тяготения уже не могут быть скомпенсированы центробежным напором термоядерной реакции. В результате звезда схлопывается, разогреваясь до огромных температур, и возникает взрыв сверхновой. Температура этого коллапса гораздо выше прежней, и потому синтезируются более тяжелые, чем гелий, элементы, благодаря которым существует земная жизнь.

Газовые облака, порожденные подобными взрывами, относительно быстро охлаждаются, а флуктуации их плотности приводят к образованию менее массивных сгустков, в которых силы тяготения и термоядерного напора уже могут поддерживать баланс (компенсировать друг друга) в течение миллиардов лет. Эти сгустки и образовали стационарные звезды, а взаимное тяготение звезд сформировало их скопления-галактики числом $\sim 10^{11}$.

Наше Солнце находится ближе к краю одной из спиралевидных галактик, в состав которой входят еще сотни миллиардов звезд.

В древности ФКМ казалась статичной — теперь видна динамика того, как *закономерности* усложнения структур пробиваются через *хаос* случайных взаимодействий. На месте одной из флуктуаций плотности солнечной туманности примерно 4,5 млрд лет назад образовалась Земля, содержащая множество сложных материальных структур. Их образование определяется свойствами атомов, синтезированных в термоядерных «котлах».

Неполнота внешней электронной оболочки каждого химического элемента индивидуальна и задает валентности двух видов. Валентность «по горизонтали» определяет соединения с другими атомами, а «по вертикали» — усложнения самих атомов. Атом натрия, например, может «по вертикали» превратиться в атом магния, имеющий на один электрон больше, а «по горизонтали» может присоединить к себе, например, атом хлора. Молекулы обретают собственные возможности формирования связей в процессе химических реакций.

Некоторые реакции протекают в присутствии катализаторов, существуют в частности *автокаталитические* реакции, катализатором которых является собственный продукт реакции, — по мере его накопления она протекает быстрее. Среди автокаталитических встречаются *циклические* реакции, в которых исходный продукт в результате ряда преобразований порождает тот же самый продукт, т.е. осуществляется его *самовоспроизведение*. Есть реакции, в которых участвуют несколько циклов, связанных так, что продукты одного являются катализаторами для другого. Подобная динамическая система называется *гиперциклом*, и она обладает уже некоторыми признаками живого: круговорот вещества и энергии, воспроизведение с наследованием информации, приспособляемость к изменяющимся условиям¹.

В 1953 г. американцы С. Миллер и Г. Юри воспроизвели в колбе атмосферу древней Земли (водород, водяной пар, метан и аммиак) и подвергли ее нагреванию и электрическим разрядам, имитируя солнечное излучение и грозы. В этом аналоге первичного земного «бульона» были обнаружены простейшие аминокислоты, входящие в состав белков. При усложнении опытов получено больше видов аминокислот, а также некоторые белки и жиры. Важную роль в происхождении земной жизни играла также панспермия, т.е. занос из космоса простейшей органики в составе метеоритов.

Существенным этапом развития органической материи стало ее влияние на среду обитания — под свои нужды. Способные на это циклы получали преимущества роста и размножения по сравнению с другими. Вершина таких процессов — живая клетка, содержащая встроенные программы поведения. Она является, в сущности, миниатюрным компьютеризированным химическим заводом высочайшего уровня сложности. Такие технологические достижения человеку пока недоступны.

Гениальное изобретение природы — сетевой принцип увязывания структурных единиц жизни. Сети бактерий, растений, клеток многоклеточных организмов и самих организмов (социумы) лучше соответствуют задачам выживания. У них шире каналы взаимодействия со средой, они тоньше дифференцируют ее сигналы, опираются на взаимодействие всех своих со-

¹ Эйген М., Шустер П. Гиперцикл. Принципы самоорганизации макромолекул. М.: Мир, 1982.

ставляющих и тем самым строят более адекватную ФКМ, отвечающую задачам выживания и развития.

Вершина сетевых структур — нейронная сеть человеческого мозга, которая предстает как продукт эволюции неорганической, а затем и органической материи. Проникая мыслью в грандиозные процессы Вселенной, человек обнаружил целый ряд вызывающих интерес космических объектов — квазары, пульсары, двойные звезды, скопления галактик, черные дыры в ядрах галактик, темная материя и т.д. В то же время очевидно, что ФКМ современного и древнего человека различаются не в меньшей степени, чем ФКМ древнего человека и человекообразных обезьян. В этом свете человека вряд ли можно считать венцом Вселенной и конечной целью ее развития. Не нам судить, нуждается ли она в наблюдателе. Бесспорно лишь то, что в развитии *земной* органики человек — ее высшее звено.

12.9. Работа с непредставимым

Эволюционно обусловленные биофизические возможности человека имеют основания, лежащие вне этих возможностей. Поэтому построение адекватной ФКМ требует выхода за их пределы. Здесь человек получает невиданный творческий простор, но расплачивается утратой способности *представлять себе* те объекты мышления, которые для их восприятия не обусловлены эволюцией. Правое, образное, полушарие не подготовлено к тому, чтобы воображать объекты, с которыми он дела не имел. В то же время левое, аналитическое, полушарие свободно от таких ограничений. Почему не предположить, что через точку можно провести не одну прямую, лежащую в одной плоскости с данной прямой и не пересекающую ее (Лобачевский)? Почему не предположить, что нельзя провести вообще ни одной такой прямой (Риман)? Наше исторически евклидовое воображение представить эти варианты не в состоянии, но мозг может построить на их основании другие геометрии, которые затем находят применение.

Вообще, логически непротиворечивые системы стали проявлять удивительное «жизнелюбие». Если при рождении они кажутся лишь игрой ума, то впоследствии оказываются адекватными реальности и потому востребованными. Это относится к воплощенным в жизнь идеям В. А. Фабриканта о лазере, Л. де Бройля о волновых свойствах частиц, М. Планка о квантах энергии, А. Эйнштейна о гравитационных волнах и т.д. Даже в пределах реальной практики возникают порой, казалось бы, отвлеченные теории, которые завтра оказываются жизненными. Например, немецко-российский математик Л. Эйлер, размышляя, как обойти семь мостов Кенигсберга, чтобы ни по одному из них не пройти дважды, заложил тем самым основы теории графов, нашедшей потом широкое применение.

Для 1826 г. мысли Н. И. Лобачевского были весьма смелы — они стали неожиданной нагрузкой для человеческого воображения. В следующем веке его ожидали еще большие испытания теорией относительности и квантовой механикой.

Вот пример, дополняющий и развивающий материал параграфа 9.7. Если на диафрагму с двумя щелями падают друг за другом отдельные электроны, то оказывается, что получаемый на экране Э результат зависит от условий наблюдения (рис. 12.3, а). Если щель В закрыта, тогда за длитель-

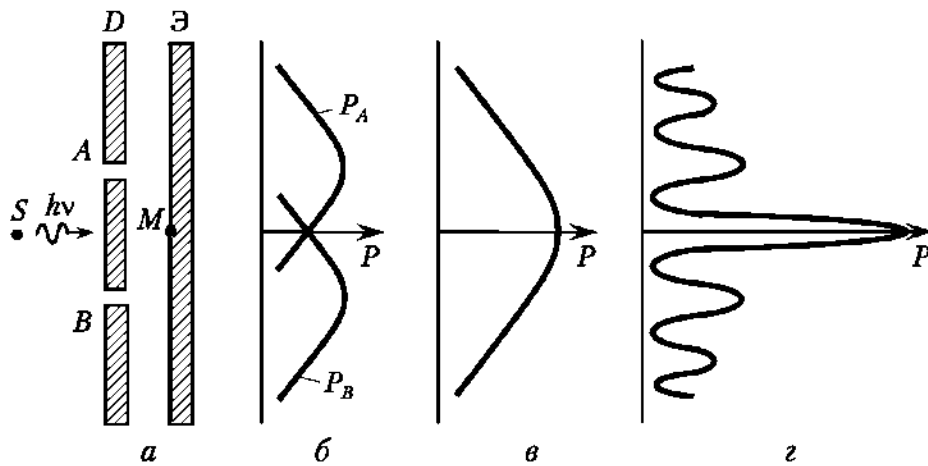


Рис. 12.3

ное время возникнет распределение электронов P_A (рис. 12.3, б), отражающее дифракционный максимум функции ψ электронов (см. параграф 9.5). Если открыть щель B и закрыть A , то получим на экране аналогичное, но смещенное распределение P_B . Если открыть теперь обе щели, то должно быть получено, казалось бы, суммарное распределение, представленное на рис. 12.3, в, однако возникает картина, показанная на рис. 12.3, г. Она свидетельствует, что пролет электрона через щель A не является *независимым* от щели B , и наоборот.

Казалось бы, электрон не может «чувствовать» существование соседней щели, поскольку раздваиваться не может. Действительно, если рядом со щелями поставить датчики, реагирующие на пролет частицы, то они будут щелкать *либо* у щели A , *либо* у щели B . Однако при наличии датчиков распределение на экране приобретает именно тот (ожидаемый) вид, который показан на рис. 12.3, в! Из этого следует, что *при «подсматривании»* за их пролетом частицы изменяют поведение, поскольку *изменяется цепь событий*. События с датчиками состоят в следующем: 1) частица из источника S попадает в A ; 2) частица из A попадает в точку M экрана.

Вероятность такой совокупности событий равна произведению их вероятностей и определяет кривую P_A на рис. 12.3, б. То же и в варианте, когда электрон попадает в B , а затем в M — эта совокупность событий формирует кривую P_B на рис. 12.3, б. Вероятность того, что произойдет *либо* первая совокупность событий, *либо* вторая, равна *сумме* их вероятностей, которая и формирует кривую на рис. 12.3, в. Если же датчики убрать, то совокупность событий изменяется: 1) электрон долетает до диафрагмы D , имея какие-то амплитуды вероятностей его появления в области A и B ; 2) от диафрагмы D он попадает в точку M с вероятностью, определяемой суммой вероятностей первых двух событий, с учетом амплитуд и фаз волновой функции. А такое суммирование дает *интерференцию*, показанную на рис. 12.3, г.

Представить себе все это весьма непросто, но требование *представимости* из условий научного анализа постепенно ушло — оно перестало быть критерием истины. Будучи продолжением наших органов чувств, человеческое воображение пользуется *лишь весьма* ограниченным ресурсом — теми образами, понятиями и стилем мышления, которые эволюционно складывались в макромире нашего вида. Если бы размер человека был соизмерим с размером электрона, он, вероятно, рассуждал бы иначе.

Тот факт, что, несмотря на невозможность представить себе объект, человек достраивает им ФКМ, — это истинная революция в научном мировоззрении. Более того, освобождение от привычных ограничений и догм вошло даже в творческий принцип: новая теория должна быть достаточно «сумасшедшей» (Н. Бор). До этого революционные «странности» такого рода позволяли себе лишь художники и представители других гуманитарных направлений, но не представители *точных наук*.

12.10. Систематизация объектов физической картины мира

Целостность ФКМ предполагает связь *разных* физических явлений на тех или иных *общих* основаниях. В той мере, в какой человек к этому стремится, стала намечаться и интеграция знаний. Дж. Максвелл предположил, что наряду с явлением электромагнитной индукции должно существовать симметричное ему явление магнитоэлектрической индукции (см. параграф 6.9). Это позволило открыть общее основание двух явлений — электромагнитную волну, которое превратило разные явления в разные стороны одного и того же явления. Л. де Бройль сделал вывод, что квантовые свойства излучения имеют симметричную противоположность — волновые свойства частиц (см. параграф 9.5), и здесь произошло такое же объединение.

Осуществляемый со времен древних греков поиск «основы всех вещей» привел к тому, что разнообразие *химических элементов* удалось свести всего к трем частицам — электрону, протону и нейтрону, комбинируемых в соответствии с принципом Паули (см. параграф 9.9). Он выступает здесь как *системообразующий алгоритм*, который задает селективное (избирательное) структурное наращивание заряда и массы атомов. Объединив таким образом россыпь химических элементов, он превратил таблицу Менделеева в целостную картину. Нечто подобное пытаются сделать и на более глубоком уровне материи, определяемом фундаментальными взаимодействиями.

А. Эйнштейн был поглощен идеей общей гармонии природы, выражающейся в том, что разные виды взаимодействия есть проявления некой единой сущности. Она проявляет себя, в частности, в единстве инертной и гравитационной масс. Тридцать последних лет своей жизни А. Эйнштейн посвятил попыткам описать единым образом гравитационное и электромагнитное взаимодействия, но не располагал многими сведениями о носителях и видах взаимодействия, которые появились позже. Однако **единая теория поля**, объединяющая все виды взаимодействий, не сформулирована и поныне. Частным успехом явилась разработка американскими физиками С. Вайнбергом и Ш. Глешоу и физиком пакистанского происхождения А. Саламом **единой теории электрослабых взаимодействий**. Она объединяет электромагнитное и слабое взаимодействия (Нобелевская премия 1979 г.). Один из результатов этой теории — предсказание частиц, ответственных за слабое взаимодействие. В 1982—1983 гг. они действительно были найдены. На очереди — «великое объединение» электрослабого взаимодействия с сильным, а далее — «супергравитация», которая включила бы также и тяготение.

Основная сложность на пути этих грандиозных проектов — отсутствие такой же систематизации на *общих основаниях* множества элементарных частиц, какая сделана для химических элементов. Новые частицы открывают на базе представлений об их возможных взаимодействиях с другими части-

цами. Эксперименты по их выявлению требуют весьма больших энергий, поскольку уменьшение размера Δx частицы сокращает время Δt ее взаимодействия с другой: $\Delta t \sim \Delta x/c$. В соответствии с формулой (9.17), это увеличивает неопределенность ΔW энергии, а поскольку $W > \Delta W$, то для экспериментов требуются все большие энергии. Отсюда ясно, почему **физику элементарных частиц** называют также **физикой высоких энергий**.

Наибольшей энергией ($\sim 10^{11}$ ГэВ) обладают **первичные космические лучи**. Они возникают в результате термоядерных реакций в звездах, ускоряются в электромагнитных полях звезд и межзвездной материи и содержат протоны, α -частицы, ядра различных элементов, электроны, нейтрино, коротковолновое излучение и т.д. Те из них, что имеют заряд, захватываются магнитным полем Земли и образуют *радиационные пояса*: внешний — на расстоянии $\sim 10^4$ км и внутренний — на расстояниях $\sim 6 \cdot 10^2 - 6 \cdot 10^3$ км от поверхности Земли. В этих зонах ионизирующее излучение взаимодействует с молекулами атмосферы и производит **вторичные космические лучи**, которые преобладают на высотах, меньших 20 км.

Земные ускорители также позволяют разгонять частицы до больших энергий, хотя и существенно меньших, чем в космических лучах. В то же время эксперименты на ускорителях имеют преимущества: их можно проводить в нужное время, в нужном месте, с *заданными* «снарядами» и «мишенями». Особенно эффективны **ускорители со встречными пучками** частиц (коллайдеры), в которых один из них играет роль снаряда, а другой — мишени. При такой схеме, одним из инициаторов которой является советский физик Г. И. Будкер (1918—1977), относительная энергия снаряда и мишени почти удваивается по сравнению с неподвижной мишенью.

Важнейшей базой упорядочивания «россыпи» известных частиц являются законы сохранения, для характеристик которых уже недостаточно заряда, массы, спина и времени жизни.

Американский физик М. Гелл-Манн (Нобелевская премия 1969 г.) и независимо от него швейцарский физик Г. Цвейг выдвинули в 1964 г. идею **кварков**. Она состоит в том, что многообразие частиц подобно многообразию химических элементов в том смысле, что оно имеет общую основу. Многие частицы состоят из комбинации трех кварков u, d, s , имеющих, в частности, *дробные* электрические заряды: $2/3e, -1/3e$ и $-1/3e$ соответственно. Каждому кварку соответствует свой антикварк (термин «кварк» заимствован из произведения ирландского писателя Д. Джойса, где он означал нечто потустороннее).

Модель кварков подтверждена экспериментами американских физиков Дж. И. Фридмана, Г. У. Кендалла и Р. Е. Тейлора, напоминающими эксперименты Э. Резерфорда: они осуществили рассеяние быстрых электронов на нуклонах. Выяснилось, что, например, протон содержит три точечных рассеивающих центра: два с зарядами $2/3e$ и один с зарядом $-1/3e$ (Нобелевская премия 1990 г.).

Тремя кварками дело не ограничилось — понадобилось привлекать и другие, с такими характеристиками (квантовыми числами), как «странность», «цвет», «очарование», а также ввести в рассмотрение **глюоны** — связующие их частицы (от англ. *glue* — клей). Соответственно появились и новые законы сохранения, выражающие ту или иную *симметрию*, нарушение которой приводит к новым поискам и новым открытиям.

В настоящее время наличие шести разных кварков признано установленным, а существовать они могут только в связанном состоянии — в виде тех или иных частиц. Возможно, когда-нибудь мы научимся делить протоны и нейтроны, освобождая энергию много большую, чем при делении и синтезе ядер.

В настоящее время концепция ФКМ в части элементарных частиц основана на идее квантовых полей, которые включают их особенности в виде тех или иных частиц и переносчики взаимодействия между ними. При этом вычлениают **четыре фундаментальных взаимодействия**. Их считают фундаментальными, так как ни одно из них не сводится к другому, но полагают при этом разными проявлениями чего-то общего, единого.

Сильное взаимодействие происходит между нуклонами. Оно не зависит от наличия у них заряда (*зарядовая независимость*) и действует только на расстояниях порядка размеров ядра (*короткодействие*).

Электромагнитное взаимодействие характерно для *заряженных* частиц и фотонов, а также рождения-уничтожения электронно-позитронных пар и имеет *неограниченный* радиус действия.

Слабое взаимодействие возникает при β -распаде ядер и действует только на небольших расстояниях (*короткодействие*).

Гравитационное взаимодействие характерно для любых видов материи и имеет неограниченный радиус действия.носителем гравитационного взаимодействия является бозон Хиггса (бозон — частица с целым значением спина).

Каждое из взаимодействий характеризуется безразмерной постоянной, которая показывает его относительную силу и характерное для него время. Для сильного взаимодействия порядок этих величин — 10 и 10^{-23} с, для электромагнитного — 10^2 и 10^{16} с, для слабого — 10^{14} и 10^8 с, для гравитационного — 10^{-39} , а время не определено.

Принятая к настоящему времени **Стандартная модель** описывает все виды взаимодействия, лежащие в основе ФКМ. Предполагается, что на ранних стадиях существования Вселенной все фундаментальные взаимодействия были объединены в одно общее и лишь потом разделились. Если это так, то для реализации антропного принципа нет необходимости одновременно и *независимо друг от друга* точно подгонять целых шесть мировых констант — достаточно иметь лишь одну общую, пока нам неизвестную.

Стандартная модель сводит всю номенклатуру известных частиц и соответствующих им античастиц к некоторому фундаментальному минимуму, а их набор (приблизительно из 20 частиц), способен обосновать результаты миллионов экспериментов. Недавний успех Стандартной модели — экспериментальное подтверждение предсказанного существования бозона Хиггса, ответственного за тяготение, за которое британский физик П. Хиггс и бельгийский физик Ф. Энглер в 2013 г. получили Нобелевскую премию по физике. Тем не менее Стандартная модель не является окончательной и продолжает расширяться.

12.11. Человек в физической картине мира

Если когда великое объединение и состоится, это вряд ли повлечет единство законов поведения материи на ее макроуровне. Надо полагать, они сохраняют то своеобразие, которое делит физику на разделы, поскольку свой-

ства тел не сводятся к взаимодействию элементарных частиц, из которых тела состоят, — каждый уровень сложности имеет свою специфику. Однако и на макроуровне материи интеграционные процессы в построении ФКМ весьма заметны. Благодаря междисциплинарным связям возникают такие гибридные науки, как астрофизика, биофизика, физическая химия, а в области инженерной деятельности — бионика, включающая эволюционные находки природы в физические принципы конструирования машин и технологий.

Своеобразная интеграция возникает и вследствие взаимоувязки разных по физической природе явлений для решения общей научно-технической задачи. Пример — коллайдер или интерферометр для изучения гравитационных волн, построение и работа которых интегрируют достижения многих направлений физики. То же относится ко многим другим человеческим изделиям, например к автомобилю, о котором речь шла во введении. Наконец, и сам человек во многом представляет собой сложную биофизическую машину, выполняющую разнообразные задачи путем интеграции механических, термодинамических, электромагнитных, волновых, химических, информационных и других внутренних процессов. Человек — такая же неотъемлемая составляющая ФКМ, как и другие ее объекты, а осознание его места в мире — острая проблема его собственного мышления.

Существует концепция, сводящая человека к биофизическому компьютеру. Ее полигоном стала программа создания искусственного интеллекта (ИИ). Реализация программы основана на гипотезе, что работа мозга сводится к алгоритмам. Это, казалось бы, материалистическое предположение содержит, однако, свою противоположность — ведет к некоему высшему разуму. Действительно, если мозг — только носитель алгоритмов, то физический носитель нетрудно и заменить — им может быть, например, электромагнитная волна. Тогда оцифрованная информация об алгоритмах мозга (и тела) может быть послана куда угодно, что позволит реконструировать на месте копию индивида на подходящем к местным условиям носителе — твердотельном, органическом или ином. Нетрудно вообразить, что именно это и осуществлено на Земле, и тогда человек оказывается продуктом, созданным, а возможно, и управляемым кем-то извне. Именно так считал Платон (и не только): человек — это игрушка Бога.

У компьютера и человека действительно много общего. Нейроны коры головного мозга, как и транзисторы компьютера, взаимодействуют с помощью электрических импульсов, генерируемых перепадом потенциала на двойном электрическом слое. Он подобен тому, что возникает, например, в *p-n*-переходе полупроводника (см. параграф 10.9), но формируется диффузией не электронов и дырок через контакт полупроводников разного типа, а ионов Na^+ и K^+ через мембрану нервной клетки. Как и компьютер, мозг имеет операционные системы, базы данных, блоки памяти и интерфейс.

Прогресс компьютеров ведет к тому, что роботы неуклонно вытесняют человека со всех площадок его деятельности — от кухни до космоса и средств ведения войны. Компьютер обыгрывает чемпиона мира по шахматам и профессионалов китайской игры го (стратегии которой имеют гораздо больше комбинаций, чем шахматы). Компьютер моделирует поведенческие реакции человека и т.д. Мозг выигрывает там, где алгоритмов недостаточно, а нужна творческая интуиция, эмоции и т.п. — то, что называют ментально-

стью, душой. Некоторые разработчики ИИ считают, что для всего этого просто не найдены еще алгоритмы нужного уровня сложности, другие ученые полагают, что они не будут найдены никогда.

Резюме

Сократу приписывают высказывание: «Я знаю, что ничего не знаю». Примерно то же происходит с физической картиной мира: по мере разрастания ее глубины и масштабов возрастает и число тайн, побуждающих мышление к дальнейшим поискам. Достаточно сказать, что наша Вселенная состоит в основном из темной материи, представлений о которой мы пока не имеем. Здесь уместно вспомнить «Мое кредо» великого физика современности А. Эйнштейна: «Самое прекрасное и глубокое переживание, выпадающее на долю человека, — это ощущение таинственности. Оно лежит в основе религии и всех наиболее глубоких тенденций в искусстве и науке. <...> Способность воспринимать то непостижимое для нашего разума, что скрыто под непосредственными переживаниями, чья красота и совершенство доходят до нас лишь в виде косвенного слабого отзвука, — это и есть религиозность. В этом смысле я религиозен»¹.

Всякий человек стремится представлять мир, в котором живет. Тем более это относится к людям с высшим образованием. Для многих профессий ФКМ важна не только сама по себе — важна *динамика* ее формирования, связанная с преодолением недостатков и тупиков мышления. Приведенные выше примеры позволяют в какой-то мере ее понимать и прогнозировать.

На пути построения ФКМ мышление выработало множество эффективных подходов и приемов — анализ, синтез, вычлениение главного, дополнение до целого, уточнение, выявление аналогий, абстрагирование и т.д. Они важны не только как инструменты формирования общечеловеческой ФКМ, но и для непосредственной профессиональной деятельности, которая опирается на или иные ее базовые фрагменты. Курс физики вооружает мышление не только знаниями и навыками, но и вкусом к творчеству, разнообразными методами решения профессиональных технических, технологических и иных задач независимо от содержания профессии.

Вопросы для самоконтроля

1. Почему наблюдаемые спектры излучения земных и внеземных химических элементов различаются, и как именно?
2. Каковы физическая и эволюционная базы человеческого мышления?
3. Что такое элементарная частица?
4. Что общего и в чем разница между протоном и нейтроном?
5. В чем состоит задача построения единой теории поля?
6. Есть ли смысл строить модели, не имея для этого доказанных оснований?
7. В чем состоят условия самоорганизации материи?
8. Достаточно ли для выживания человека содержащейся в его клетках генетической информации?
9. Кем является человек — объектом или субъектом природы?
10. Какова роль физики в существовании и развитии человека?

¹ Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. IV. М.: Наука, 1967. С. 175–176.

Темы реферативных работ

1. Виды телескопов и история их развития.
2. История астрофизических исследований.
3. Основные этапы развития Вселенной и Солнечной системы.
4. Теория тепловой смерти Вселенной.
5. Основы теории самоорганизации материи.
6. Причины и тенденции развития физики высоких энергий.
7. Виды взаимодействий и систематизация элементарных частиц.
8. История и тенденции построения единой теории поля.
9. Принципы соответствия, дополнительности и роль наблюдения в результатах физического эксперимента.
10. История дифференциации и интеграции объектов физического мышления.

Литература

1. *Азинцев, С. Е.* Озарения. Собр. соч. В 3 т. Т. 3. / С. Е. Азинцев. — Рязань : Пресса, 2006. — 359 с.
2. *Азинцев, С. Е.* О материалистической концепции механизма открытий. Части 1–4 / С. Е. Азинцев // Экономические стратегии. — 2013. — № 5. — С. 112; № 6. — С. 126; № 7. — С. 104; № 8. — С. 92.
3. *Айзензон, А. Е.* Курс физики : учеб. пособие / А. Е. Айзензон. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Высшая школа, 2009. — 374 с.
4. *Айзензон, А. Е.* Задачник по физике / А. Е. Айзензон, В. Н. Кудинов. — М. : Модус, 1998. — 278 с.
5. *Айзензон, А. Е.* Физические основы вооружения и военной техники : учеб. пособие / А. Е. Айзензон. — Рязань : РВВДКУ, 2014. — 206 с.
6. *Витковски, Н.* Сентиментальная история науки / Н. Витковски ; пер. с фр. Д. Баюка. — М. : КоЛибри, 2007. — 448 с.
7. *Волькенштейн, В. С.* Сборник задач по общему курсу физики / В. С. Волькенштейн. — М. : Книжный мир, 2008. — 328 с.
8. *Горобец, Б. С.* Круг Ландау: Физика войны и мира / Б. С. Горобец. — М. : ЛКИ, 2009. — 272 с.
9. *Григорьев, И. С.* Физические величины. Справочник / И. С. Григорьев, Е. З. Мейлихов. — М. : Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.
10. *Ильин, В. А.* История и методология физики / В. А. Ильин, В. В. Кудрявцев. — М. : Издательство Юрайт, 2014. — 579 с.
11. *Карнап, Р.* Философские основания физики. Введение в философию науки : пер. с англ. / Р. Карнап. — 4-е изд. — М. : ЛКИ, 2008. — 360 с.
12. *Мигдал, А. Б.* Квантовая физика для больших и маленьких / А. Б. Мигдал. — М. : Наука, 1989. — 147 с.
13. *Мухин, К. Н.* Российская физика нобелевского уровня / К. Н. Мухин, А. Ф. Суставов, В. Н. Тихонов. — М. : Физматлит, 2006. — 228 с.
14. *Николис, Г.* Познание сложного : пер. с англ. / Г. Николис, И. Пригожин. — М. : URSS, 2014. — 360 с.
15. Оружие и технологии России. XXI век : энциклопедия. Т. 1–16. — М. : Оружие и технологии, 2000–2007.
16. *Пиковер, К.* Великая физика / К. Пиковер. — М. : Бином, 2015. — 551 с.
17. *Сажин, М. В.* Современная космология в популярном изложении / М. В. Сажин. — М. : URSS, 2002. — 240 с.
18. *Сурин, А. В.* Судьбы творцов российской науки / А. В. Сурин ; отв. ред. и сост. А. В. Сурин и М. И. Панов. — М. : URSS, 2002. — 352 с.
19. *Трофимова, Т. И.* Курс физики : учеб. пособие / Т. И. Трофимова. — М. : Академия, 2006. — 560 с.
20. *Трофимова, Т. И.* Руководство к решению задач по физике : учеб. пособие. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2015. — 265 с.
21. *Храмов, Ю. А.* Физики. Биографический справочник / Ю. А. Храмов. — М. : Наука, 1983. — 400 с.
22. *Хокинг, С.* Краткая история времени: от Большого взрыва до черных дыр : пер. с англ. / С. Хокинг. — СПб. : Амфора, 2015. — 240 с.

23. Физика. Большой энциклопедический словарь / гл. ред. А. М. Прохоров. — М. : Большая российская энциклопедия, 1999.
24. Физика XIX—XX вв. в общенаучном и социокультурном контекстах. Физика XX в. и ее связь с другими разделами естествознания : сб. статей / отв. ред. Г. М. Идлис. — М. : Янус-К, 1997. — 304 с.
25. Яворский, Б. М. Основы физики : учеб. пособие. Т. 1, 2 / Б. М. Яворский, А. А. Пинский. — М. : Физматлит, 2003. — 1128 с.
26. Яворский, Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, А. К. Лебедев. — М. : Оникс, 2006. — 1056 с.

Новые издания по дисциплине «Физика» и смежным дисциплинам

1. Бондарев, Б. В. Курс общей физики. Книга 1: Механика : учебник для бакалавров / Б. В. Бондарев, Н. П. Калашников, Г. Г. Спиринов. — М. : Издательство Юрайт, 2016.
2. Бондарев, Б. В. Курс общей физики. Книга 2: Электромагнетизм, оптика, квантовая физика : учебник для бакалавров / Б. В. Бондарев, Н. П. Калашников, Г. Г. Спиринов. — 2-е изд. — М. : Издательство Юрайт, 2016.
3. Бондарев, Б. В. Курс общей физики. Книга 3: Термодинамика, статистическая физика, строение вещества : учебник для бакалавров / Б. В. Бондарев, Н. П. Калашников, Г. Г. Спиринов. — 2-е изд. — М. : Издательство Юрайт, 2016.
4. Бугаенко, Г. А. Механика : учебник для вузов / Г. А. Бугаенко, В. В. Маланин, В. И. Яковлев. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2016.
5. Бухарова, Г. Д. Физика. Молекулярная физика и термодинамика. Методика преподавания : учеб. пособие для академического бакалавриата / Г. Д. Бухарова. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2016.
6. Бухарова, Г. Д. Физика. Электричество и магнетизм. Методика преподавания : учеб. пособие для академического бакалавриата / Г. Д. Бухарова. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2016.
7. Гольдштейн, А. Е. Физические основы получения информации : учебник для прикладного бакалавриата / А. Е. Гольдштейн. — М. : Издательство Юрайт, 2016.
8. Кравченко, Н. Ю. Физика : учебник и практикум для прикладного бакалавриата / Н. Ю. Кравченко. — М. : Издательство Юрайт, 2016.
9. Кузнецов, С. И. Курс лекций по физике. Классическая и релятивистская механика : учеб. пособие для прикладного бакалавриата / С. И. Кузнецов, Л. И. Семкина. — М. : Издательство Юрайт, 2016.
10. Кузнецов, С. И. Физика: оптика. Элементы атомной и ядерной физики. Элементарные частицы : учеб. пособие для вузов / С. И. Кузнецов. — М. : Издательство Юрайт, 2016.
11. Матышев, А. А. Атомная физика в 3 ч. Часть 1. Дискретность вещества и электрического заряда : учеб. пособие для академического бакалавриата / А. А. Матышев. — М. : Издательство Юрайт, 2016.
12. Матышев, А. А. Атомная физика в 3 ч. Часть 2. Дискретность электромагнитного излучения : учеб. пособие для академического бакалавриата / А. А. Матышев. — М. : Издательство Юрайт, 2016.
13. Матышев, А. А. Атомная физика в 3 ч. Часть 3. Дискретность динамических переменных классической физики : учеб. пособие для академического бакалавриата / А. А. Матышев. — М. : Издательство Юрайт, 2016.
14. Милантьев, В. П. Атомная физика : учебник и практикум для академического бакалавриата / В. П. Милантьев. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2016.
15. Никеров, В. А. Физика : учебник и практикум для академического бакалавриата / В. А. Никеров. — М. : Издательство Юрайт, 2015.

16. *Оселедчик, Ю. С.* Физика. Модульный курс (для технических вузов) : учебное пособие для бакалавров / Ю. С. Оселедчик, П. И. Самойленко, Т. Н. Точилина. — М. : Издательство Юрайт, 2016.
17. Практические занятия по общему курсу физики : учебник для бакалавриата и магистратуры / Г. В. Ерофеева, Ю. Ю. Крючков, Е. А. Складорова, И. П. Чернов. — М. : Издательство Юрайт, 2016.
18. *Родионов, В. Н.* Физика : учеб. пособие для академического бакалавриата / В. Н. Родионов. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2016.
19. *Скуридин, В. С.* Фармацевтическая технология. Методы и технологии получения радиофармпрепаратов : учеб. пособие для академического бакалавриата / В. С. Скуридин. — М. : Издательство Юрайт, 2016.
20. Физика : учебник и практикум для прикладного бакалавриата / В. А. Ильин, Е. Ю. Бахтина, Н. Б. Виноградова, П. И. Самойленко ; под ред. В. А. Ильина. — М. : Издательство Юрайт, 2016.
21. Физика. Словарь-справочник в 2 ч. : справочник для вузов / Е. С. Платунов, В. А. Самолетов, С. Е. Буравой, С. С. Проппкин. — 2-е изд., стер. — М. : Издательство Юрайт, 2016.

Отвѣты

Глава 1

- 1.6. Да. Не зависит.
1.7. $3,02 \cdot 10^4$ кг.
1.8. $1,18 \cdot 10^3$ м.
1.9. $3,95 \cdot 10^3$ м/с.
1.10. 11 с.

Глава 2

- 2.6. 56,5 Н.
2.7. > 16 см.
2.8. 10,6 м/с.
2.9. 300 м/с в обратном направлении.
2.10. 22,5 км/ч.

Глава 3

- 3.6. 231 м/с.
3.7. $75,4 \text{ с}^{-1}$, $7,54 \text{ с}^{-2}$.
3.8. $6,97 \cdot 10^{-8} \text{ кгм}^2$, $1,49 \text{ кгм}^2/\text{с}$.
3.9. 12,1 кДж.
3.10. 4,45 кВт.

Глава 4

- 4.6. $2,8 \cdot 10^2$.
4.7. 0,36 л; -17°C .
4.8. 5 м.
4.9. 4,2 м/с.
4.10. 120 Дж.

Глава 5

- 5.6. 4,78 мкДж.
5.7. 63,1 В.
5.8. 70%.
5.9. Да.
5.10. 0,25 Вт.

Глава 6

- 6.6. $8,36 \cdot 10^{-6} \text{ А} \cdot \text{м}^2$.
6.7. 20 А.

- 6.8. $64^\circ 30'$.
6.9. 1,22 мГн.
6.10. 95.

Глава 7

- 7.6. $2,17 \cdot 10^7$.
7.7. а) 500 Гц; б) 1000 Гц.
7.8. 1,5 кГц; 120 м.
7.9. 7.
7.10. 1,33.

Глава 8

- 8.6. 0,138 мкм.
8.7. 0,579 мкм.
8.8. $67^\circ 52'$.
8.9. $27,5''$.
8.10. 15° .

Глава 9

- 9.6. 0,148.
9.7. 700 см^2 ; 4,3 мкм.
9.8. 0,11.
9.9. 103 К.
9.10. 3,75 эВ.

Глава 10

- 10.6. $6 \cdot 10^7$ Па.
10.7. а) 0,405; б) 0,595.
10.8. 10^{-22} эВ.
10.9. 49 А.
10.10. 0,62 эВ.

Глава 11

- 11.6. 1614 МэВ.
11.7. В девять раз.
11.8. $1,5 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг.
11.9. 4,5 мин.
11.10. $24,2 \text{ м}^{-1}$.