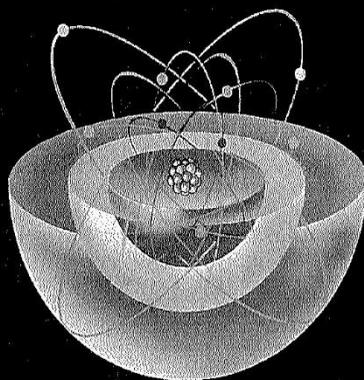


И.С. Карасова, М.В. Потапова

Фундаментальные физические теории в школе



Для профильных классов
средних образовательных
организаций

2016 г.

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Челябинский государственный педагогический университет»

И.С. КАРАСОВА, М.В. ПОТАПОВА, П.В. ПЕКИН

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
ФИЗИЧЕСКИЕ ТЕОРИИ В ШКОЛЕ**

Учебное пособие

Челябинск
2016

УДК 53 (07) (021)
ББК 74.262.23я73
К 21

Карасова, И.С. Фундаментальные физические теории в школе:
учеб. пособие / И.С. Карасова, М.В. Потапова, П.В. Пекин. – Челя-
бинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та, 2016. – 336 с.

ISBN 978-5-906777-72-0

Фундаментальные физические теории определяют базис научного знания. Вузовский и школьный курсы физики включают научные знания в обобщенном и систематизированном виде. Дидактической единицей обобщения физического материала как в вузе, так и в школе может быть тема, раздел курса, фундаментальная физическая теория, физическая картина мира. Последние два структурные элемента знания являются укрупненными единицами обучения. Они способны осуществлять генерализацию, интеграцию и фундаментализацию физического знания на основе его эволюции.

Методологический подход в обучении фундаментальных физических теорий первоначально апробирован на факультативных занятиях в старшей профильной школе, затем на пропедевтических занятиях по курсу общей физики в вузе. Результаты многолетнего исследования авторов представлены в учебном пособии.

Авторы благодарят за помощь по теоретическому обобщению учебного материала кандидата физ.-мат. наук, доцента Л.М. Свирскую, доктора физ.-мат. наук, профессора М.С. Свирского.

Пособие предназначено для учащихся профильных классов средних образовательных организаций, магистрантов педагогического вуза (физическое, физико-математическое образование).

Рецензенты: Е.В. Оспенникова, д-р. пед. наук, профессор
Л.М. Свирская, канд. физ.-мат. наук, доцент
В.П. Андрейчук, канд. физ.-мат. наук, доцент

ISBN 978-5-906777-72-0

© Карасова И.С., Потапова М.В., Пекин П.В., 2016
© Издательство Челябинского государственного
педагогического университета, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	7
Введение	9
Физическая картина мира и фундаментальные физические теории	13
Часть I. Классическая механика	31
Развитие классической механики	31
Материальная точка – идеализированный объект теории	33
Понятия и физические величины кинематики	35
Основные принципы механики	45
Основные законы механики	47
Некоторые применения законов механики	50
Обобщения и систематизация классической механики в таблицах, рисунках	63
Задачи и упражнения	73
Часть II. Молекулярно-кинетическая теория строения вещества	74
Развитие молекулярно-кинетической теории строения вещества	74
Положения молекулярно-кинетической теории строения вещества, их опытные обоснования	76
Принципы молекулярно-кинетической теории – законы классической статистики	93
Основное уравнение молекулярно-кинетической теории строения вещества	96
Законы Шарля, Гей-Люссака, Бойля-Мариотта	100
Законы Паскаля, Дальтона и Авогадро	100

Температура	102
Свойства конденсированных систем с точки зрения молекулярно-кинетической теории строения вещества	105
Реальные газы	109
Явления переноса с точки зрения молекулярно-кинетической теории строения вещества	114
Основные понятия и принципы термодинамики	116
Обобщения и систематизация молекулярно-кинетической теории строения вещества в таблицах, рисунках	123
Задачи и упражнения	128
Часть III. Теория электромагнитного поля	130
Возникновение теории электромагнитного поля	130
Непрерывное электромагнитное поле – идеализированный объект теории	137
Основные понятия и физические величины теории	139
Принципы теории	146
Уравнения Дж. Кл. Максвелла	148
Постоянное электрическое поле. Первое уравнение Максвелла	151
Связь переменного электрического поля с вихревым магнитным. Третье уравнение Максвелла. Электромагнитные колебания и волны	162
Обобщения и систематизация в таблицах, схемах и рисунках	166
Задачи и упражнения	175
Часть IV. Основы классической электронной теории вещества	177
Экспериментальные основы классической электронной теории вещества	177
Идеализированный объект теории	189

Понятия и принципы электронной теории вещества	191
Теория проводимости металлов	197
Электрическая проводимость жидкостей	212
Электрическая проводимость газов	214
Электрическая проводимость полупроводников	216
Электрические свойства вещества	220
Магнитные свойства вещества	224
Оптические свойства вещества	227
Обобщения и систематизация в таблицах, схемах и рисунках	232
Задачи и упражнения	236
Часть V. Специальная теория относительности	238
Классические представления о пространстве и времени	238
Пространство–время – идеализированный объект специальной теории относительности	240
Опыт Майкельсона	242
Относительность длины и времени. Относительность одновременности	244
Инерциальные и взаимные системы отсчета	248
Преобразования Лоренца	251
Следствие специальной теории относительности	253
Обобщения и систематизация в таблицах. Специальная теория относительности.....	264
Задачи и упражнения	266
Часть VI. Основы квантовой физики	267
Развитие и становление квантовой механики	267
Волны и квантование	268
Атомы и квантование	275
Волновые свойства частиц	280
Корпускулярно-волновой дуализм	282

Идеализированный объект квантовой теории	285
Основные понятия и физические величины теории	287
Принципы теории	289
Уравнение Шредингера, примеры его применения	292
Движение частиц в одномерной потенциальной яме	293
Туннельный эффект	297
Применение уравнения Шредингера к атому водорода. Квантовые числа	298
Вынужденное излучение и лазеры	307
Обобщения и систематизация в таблицах, схемах и рисунках	313
Задачи и упражнения	317
Приложение. Решение задач	318
Библиографический список	333

ПРЕДИСЛОВИЕ

Физика – наука об окружающем нас мире. Мы каждый день, ежечасно, ежеминутно пользуемся её законами, когда движемся, обогреваем своё жилище, смотримся в зеркало, пользуемся очками, слушаем радио, смотрим телевидение, пользуемся мобильными телефонами и т.д.

Физика – это не только современные технологии, она описывает на уровне фундаментальных физических теорий (ФФТ) живые и неживые процессы, происходящие как в космосе, так и в организме человека. Например, циркуляция крови в организме живых существ (человека) подчиняется тоже законам физики.

Иными словами, открытия в физике на уровнях субатомных и сверхгалактических являются попытками объяснить их с помощью теорий, в том числе фундаментальных физических, позволяющих понять окружающий мир (вселенную). Область, в которой законы, теории, естественнонаучной картины мира являются ведущими, они служат стимулом для дальнейших великих открытий.

В настоящее время физика «обдумывает» с новых позиций многообразие объектов живой и неживой материи, наличие параллельных миров, возможность существования движения в пространстве и во времени.

Научное мировоззрение учёных-исследователей в процессе новых открытий нередко кардинально меняется. Например, представления А. Эйнштейна о пространстве и времени, М. Планка о процессах излучения, В. Гейзенберга о соотношении неопределённости, дают возможность современным учёным получить представления о вселенной как о несуществующем детерминистическом объекте, представляя его с позиции загадочного набора вероятностей. Новые открытия в физике уточняют глубокие философские идеи о: постижимом и непостижимом; понимании и непонимании; причине и следствии; видимом и невидимом; необходимости и случайности; хаосе и порядке и т.д.

Эволюция физических идей, составляющих базис фундаментальных физических теорий, привела к созданию физической

картины мира (классической, электродинамической, квантово-полевой). Их основоположники – великие учёные (И. Ньютон, Л. Больцман, Дж. Кельвин, И. Пригожин, Д.К. Максвелл, А. Эйнштейн, П. Дирак, М. Кюри и др.) изменили наши представления об окружающем мире. Даже для великих умов такие понятия, как «понимание» и «непонимание» были неоднозначны. Например, гениальный физик-теоретик В. Гейзенберг выражал сомнение в том, что человечество когда-нибудь поймёт, что такое атом, между тем, Н. Бор был более оптимистично настроен. В частности, он считал, что до конца постичь истину о строении атома будет невозможно, однако в процессе самого познания человек узнает, что означает слово «понимание». Обучая физике студентов, учащихся необходимо эту мысль донести до философского понимания сути самого процесса познания.

На определённом этапе изучения научных идей, составляющих базис ФФТ как в школе, так и в вузе, целесообразно осуществлять обобщения на основе методологии учебного познания. В основе его лежит последовательность и поэтапность этого процесса, который можно выразить формулой: от основания → к ядру → к следствию. Методология учебного познания любой фундаментальной физической теории остаётся неизменной, она не зависит от области описываемых явлений и закономерностей, потому что основана на обобщенном и универсальном подходе.

Учебное пособие структурировано в соответствии с эволюцией физического знания: от механической картины мира к электродинамической и квантово-полевой. Оно не является систематическим курсом физики. Систематизирующий характер изложения учебного материала в пособии позволяет использовать его для обобщения знаний учащихся в старшей профильной школе, обучения магистрантов приёмам методологии учебного познания, обучения студентов методике обобщения знаний и умений, способам владения ими учебным материалом на уровне сформированности компетенций, т.е. готовности и способности применять на практике знания и умения в обобщенном, систематизированном виде.

ВВЕДЕНИЕ

Содержание образования в современных условиях призвано обеспечить формирование у обучающихся современной картины мира, которая позволяет объяснить связь живой и неживой природы, научить человека жить в современном информационном потоке. Оно создаёт предпосылки и условия для самообучения, самоорганизации и саморазвития личности, обладающей ценностями, основанными на общегуманистических принципах.

Модернизация системы образования, регламентированная основополагающими нормативными документами (государственным стандартом, законом «Об образовании в РФ»), определяет целый ряд важнейших задач, решение которых может способствовать совершенствованию содержания образования, организации профильного обучения в средней школе.

Главная задача обучения физике – формирование научного (естественнонаучного) мировоззрения. Мировоззрение включает три формы интеллектуального и эмоционального опыта людей: мироощущение, мировосприятие, миропонимание. Миропонимание является определяющим, на его основе формируется и развивается научная картина мира, в том числе физическая, базис которой составляют законы и категории философии, естествознания (физики).

Доминирующее положение в естественнонаучной картине мира занимает физическая картина мира (ФКМ), которая вносит существенный вклад в формирование фундаментальных физических понятий, имеющих статус философских категорий (материя, её виды, формы движения, способы существования), оказывающих существенное влияние на мировоззрение школьников.

В структуре ФКМ фундаментальные идеи занимают важное место. По мере её формирования важнейшие физические идеи, принципы, концепции, понятия и законы уточняются, развиваются, отражая эволюционный процесс зарождения и смены

представлений об окружающем нас мире. В настоящее время сложились три картины мира: механическая, электродинамическая, квантово-полевая, которые описывают процессы эволюции развития наших представлений о материи, её видах, способах существования.

Курс физики в школе (вузе) построен в соответствии с эволюцией физической картины мира: от механической к электродинамической, а от неё к квантово-полевой. Базис каждой картины мира составляют фундаментальные физические теории, которые в соответствии с исследованиями Ю.И. Дика, Л.Я. Зориной, В.В. Мултановского, В.Г. Разумовского можно считать дидактическими единицами обучения учащихся старших классов профильной школы.

С 60–70 годов XX столетия развивается новое научное направление – синергетика, раскрывающая процессы самоорганизации в живой и неживой природе. Основоположники этого междисциплинарного направления (Г. Хакен, И. Пригожин) по существу заложили основы новой современной картины мира – синергетической (СКМ). Базис этой картины мира составляют философские идеи (единство окружающего мира – неживой и живой природы, глобальный эволюционизм, универсальность алгоритма развития на основе самоорганизации); идеи синергетики (диссипативность структур, неравновесность термодинамических процессов, фазовые переходы систем, детерминированный хаос, фракталы, аттракторы, сложность, самоорганизованная причинность, генерация).

В литературе синергетическую картину мира нередко называют «постнеклассической» (В. Аршавич, Я. Свирский). Она формирует новое представление о мире, о том, что с самого начала и к любому данному времени будущее остаётся неопределённым.

Развитие может пойти в одном из нескольких направлений, что часто определяется каким-нибудь незначительным направле-

нием. Достаточно лишь небольшого энергетического воздействия, чтобы система перестроилась и возник новый уровень организации. В этой картине мира при анализе различных структур предполагается вести исследования открытых систем, в которых велика роль исходных условий, локальных изменений и случайных фактов. Следует отметить, что идеи постнеклассической (синергетической) картины мира, её понятия (нелинейность, самоорганизация, открытость, сложность, бифуркация, категоричность, аттрактор, хаос, случайность и другие) раскрывают принципиальные её отличия не только от классической, но и от неклассической модели бытия.

Таким образом, курс физики в профильных классах реализует идеи эволюции физического знания при переходе от механической картины мира к электродинамической и квантово-полевой, а от них к постнеклассической (синергетической).

Выпускники старшей профильной школы должны понимать, что три картины мира: механическая (МКМ), электродинамическая (ЭДКМ), квантово-полевая (КПКМ) рассматривают явления, процессы жёстко связанные причинно-следственными связями. Эти связи имеют линейные характеры, в них следствие всегда соизмеримо с причиной. Настоящее определяется прошлым, а будущее – настоящим. В этих связях все предсказуемо, случайные события имеют место, но они никак не влияют на общий ход явлений на сущность причинно-следственных связей. С точки зрения методологии научного (учебного) познания единичное имеет место, но не может повлиять на общее, тем более на всеобщее. Иными словами, оно не может изменить суть фундаментальных идей (теорий), тем более повлиять на базис физической картины мира. В этой системе знания неравновесность, неустойчивость, нелинейность воспринимаются как нечто выходящее за общие рамки развития системы.

Несмотря на то, что в программу старшей профильной школы идеи постнеклассической картины мира включены в малых объёмах (хаотичность колебаний в простых нелинейных системах, автоколебательные движения маятника часов, генерирование электромагнитных волн в лазерах), но уже на их примерах можно показать, что сложные эволюционирующие открытые системы невозможно описать законами И. Ньютона, Дж. Максвелла, даже законами квантовой физики.

Системы, способные к самоорганизации, характеризуются триадой свойств: открытость, нелинейность, неравновесность. Они имеют большое количество состояний и множество путей развития вблизи точки бифуркации. Фазовые переходы таких систем могут привести к возникновению хаотических структур. Открытие «динамического хаоса», по мнению ряда учёных, (его роли в описании систем) соизмеримо с открытием теории относительности или квантовой механики. Поэтому уже сегодня идеи современной постнеклассической (синергетической) картины мира целесообразно включать в программу по физике для старшей профильной школы.

ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ТЕОРИИ

Фундаментальные физические теории составляют основу (ядро) современной физики, их можно отнести к базовым знаниям. Ядро курса физики меняется сравнительно редко, поэтому целесообразно анализировать частные факты, законы, явления и процессы на его основе.

Новые идеи, теории развивались и завоевывали себе признание часто в ожесточенной борьбе: процесс пополнения знаний приводил к появлению противоречий между новыми и существующими теориями. Эти противоречия в истории развития физического знания нередко являлись причиной революционного поворота, который завершался созданием новой теории. Возникновение физической теории начиналось, как правило, с неясных, зачастую смутных представлений, которые уточнялись, развивались и углублялись на последующих этапах развития науки. Например, с открытием в конце прошлого столетия явления радиоактивности стало ясно, что кроме гигантского космоса и окружающего нас мира, существует микромир, подчиняющийся таким закономерностям, которые не согласуются с классической физикой. Исследования мира элементарных частиц способствовало открытию ряда интересных явлений, овладению атомной энергией. Открытие квантовой структуры вещества, частиц-переносчиков взаимодействия, позволяет надеяться на то, что в ближайшее время ученые раскроют суть новой картины мира, которая будет более адекватна окружающему нас материальному миру.

Процесс познания – это движение от единичного (фактов, понятий, законов) к общему (теории), а от них – к предельно общему (физической картине мира – ФКМ). Переход от единичного и общего к предельно общему, способствует более глубокому

изучению объективного мира. ФКМ – высокий уровень систематизации знаний, здесь в большей степени осуществляется взаимосвязь науки и философии. Физическая картина мира – это модель природы, включающая в себя в самом общем виде все основные теоретические идеи определенного периода развития физики.

Познание, которое для физики служит предметным и завершенным, для философии является лишь началом восхождения на вершину философских обобщений. На этом этапе уточняется категориальный аппарат науки, глубже изучаются законы, составляющие методологическую основу курса физики. Философские категории диалектики: материя, виды, формы движения и способы ее существования – для физики составляют основной предмет ее изучения – фундаментальные физические понятия. Система философских категорий и естественнонаучных знаний дает общую картину мира.

Процесс познания можно образно сравнить со строительством здания, где структурные элементы знаний (факты, понятия, законы) сравнимы со строительным материалом для постройки этажей здания – теории. Нижний этаж этого здания соответствует классической механике, молекулярно-кинетической теории, потолок этажа сравним с механической картиной мира (МКМ). Электродинамика (теория электромагнитного поля Д.К. Максвелла, электронная теория вещества ДрUDE – Лоренца и теория относительности А. Эйнштейна) составляет следующий этаж этого здания. Верхнее перекрытие этого этажа (потолок) соответствует электродинамической картине мира (ЭДКМ), следующий этаж здания сравним с квантовой физикой (нерелятивистской квантовой механикой и релятивистской электродинамикой), завершается он квантово-полевой картиной мира (КПКМ). В последние годы идет активная застройка следующего этажа этого здания, соответствующего новой теории – квантовой хромодина-

мике (КХД). В связи с этим можно надеяться на то, что в ближайшее время будет создана новая картина мира, соответствующая фундаментальным физическим идеям КХД. Эта модель природы будет более адекватна окружающему нас миру.

Таким образом, основу каждой научной картины мира составляет фундаментальная физическая теория. Так, механическая картина мира утвердилась с разработкой классической механики И. Ньютона, ЭДКМ – электронной теории вещества Друде – Лоренца, теории электромагнитного поля Дж. Максвелла, теории относительности А. Эйнштейна. В основе квантово-полевой картины мира лежат идеи М. Планка, А. Эйнштейна, Н. Бора, Луи де Бройля, Э. Шредингера, В.Г. Гейзенберга, П. Дирака, послужившие основой создания квантовой физики. Таким образом, каждая картина отражает определенный этап познания окружающего мира, ее можно рассматривать как модель природы на определенном этапе развития физической науки. Фундаментальные физические теории не только служат основой создания научной картины мира (физической). Сформировавшаяся картина позволяет еще глубже проанализировать содержание основных структурных элементов теории, ее понятийный аппарат, законы, принципы, иными словами, их влияние взаимно.

В классической механике законы И. Ньютона выступают как универсальные законы движения материальных точек, из которых, как тогда считалось, можно построить все материальные объекты, встречающиеся в природе.

Долгое время казалось, что механика Ньютона может дать объяснение любым явлениям, однако скоро была выявлена ее ограниченность. Электромагнитная теория определила физическое (электромагнитное) поле как один из видов материи, подчиняющийся законам, математическим выражением которых являются уравнения Максвелла. Это поле порождается зарядами и токами и само воздействует на них. Электрические и магнитные

свойства вещества были объяснены Лоренцом на основании электронной теории вещества. В этой теории для описания поведения электрона применялись законы И. Ньютона. Сам электрон рассматривался в виде заряженной классической материальной точки. Специальная теория относительности А. Эйнштейна дала новые представления о «пространстве-времени». К началу XX века на основании теории Дж. Максвелла, Х. Лоренца и А. Эйнштейна, а также философских идей естественнонаучной диалектики, философского континуализма и динамизма сложилось новое мировоззрение, согласно которому материя и движение обладают континуальными свойствами, пространство и время взаимосвязаны и относительны. В этот период сформировалась электродинамическая картина мира (ЭДКМ) – общие фундаментальные физические и исходные философские идеи. Но уже в недрах ЭДКМ возникли научные факты, которые свидетельствовали об ограниченности определившегося мировоззрения. В начале XX века зарождается новая теория – квантовая механика. Это учение описывает явления атомного масштаба: движение элементарных частиц и состоящих из них систем. Движение элементарных частиц со скоростями, много меньшими скорости света, изучает нерелятивистская квантовая механика. В ней рассматриваются процессы, сопровождающиеся движением микрочастиц со скоростями, близкими к скорости света. Такое движение нередко приводит к изменению числа частиц, к их рождению и поглощению (квантовая электродинамика).

По мере того как исследователи в процессе познания продвигались от молекулы к атому, а затем – к атомному ядру с его элементарными частицами (протонами и нейтронами), удалось решить загадку взаимосвязи вещества и энергии. С развитием новых знаний появились лазеры, ЭВМ, атомная энергия, космические полеты и др.

В 1911 году Э. Резерфорд предложил планетарную модель строения атома. Позже физики детализировали картину внутреннего строения атома. Длительное время протоны, нейтроны и электроны считались единственными элементарными частицами. В 1928 году П. Дирак предсказал существование античастиц (антивещества), а в 1932 году К. Андерсон открывает позитрон, который при встрече с электроном аннигилирует. Позже физики доказали, что у каждой элементарной частицы есть своя античастица. В крупных ускорителях открывались все новые и новые частицы, их пробовали как-то классифицировать, но ясной картины не было.

В наши дни возникла новая концепция действительности, ученые пережили новую революцию, подобную той, что связана с трудами Н. Коперника об обращении Земли вокруг Солнца. В 1963 году Мюррей Гелл-Манн из Калифорнийского технологического института и Джорж Цвейг из Европейского центра ядерных исследований (Церн, Швейцария) независимо друг от друга пришли к идее о существовании еще более мелких частичек мироздания – кварков (термин М. Гелл-Манна). Позже Гелл-Манну была присуждена Нобелевская премия за эти работы (1969). Частицы имеют дробный заряд (в единицах заряда электрона): плюс-минус $1/3$; плюс-минус $2/3$. В настоящее время различают 36 типов кварков. Элементарные частицы (адроны) рассматриваются состоящими из кварков в соответствии с их «цветом» (особое свойство кварков). Например, протон состоит из двух u -кварков, имеющих положительный заряд, равный $2/3$ заряда протона, и одного d -кварка с зарядом $-1/3$. Вместе они создают частицу протон с зарядом, равным $+1$. Нейтрон образован одним u -кварком и двумя d -кварками. Соединяясь, они образуют нейтральную частицу и т.д.

При большом многообразии кварков невозможно выделить их в свободном состоянии, они существуют только в соединениях из трех кварков или в парах: кварк–антикварк. Огромное число

частиц (а их насчитывается в настоящее время несколько сотен) состоит из кварков, которые удерживаются вместе сильным ядерным взаимодействием. Исключение составляют частицы класса лептонов (важнейшая из них – электрон, входящий в атом).

В настоящее время большинство ученых считает, что вещество состоит из шести лептонов и шести типов кварков. Хотелось бы заметить: некоторые физики-теоретики предполагают, что существуют более фундаментальные частицы. Думаем, научный спор решит время. Карло Руббиа и голландец Симон ван дер Меер в 1982–1983 годах в Церне открыли частицы, получившие название калибровочных. В 1984 году ученые за свое открытие получили Нобелевскую премию. Эти частицы назвали «Z»- и «W»-частицы. Существуют они не менее одной миллиардной доли секунды, а свою короткую жизнь проводят в атомах таких элементов, как уран. Они ответственны за так называемое слабое взаимодействие и вызывают распад нейтронов в ядре радиоактивного атома, при этом образуется протон, электрон и антинейтрино. Заметим, что такими калибровочными частицами, ответственными за электромагнитное взаимодействие, которое примерно в 100 000 раз сильнее слабого взаимодействия, являются фотоны. Наиболее мощным является ядерное взаимодействие, а калибровочными частицами этого взаимодействия служат глюоны, именно они связывают воедино частицы атомного ядра. Помимо трех названных типов взаимодействия, существует ещё и гравитационное. Этот тип взаимодействия самый слабый.носителем гравитации может быть до сих пор не открытый гравитон, который не оказывает существенного влияния на атомное ядро. Но при взаимодействии тел большой массы роль этого типа взаимодействия огромна. В настоящее время физики полагают, что четыре типа взаимодействия – это проявление какой-то глубоко скрытой силы. За последние два десятилетия ученые предложили теорию «Великого объединения», согласно которой три типа взаимодействия – слабое, сильное и электромагнитное – являются

составной частью единого основополагающего взаимодействия, однако ни одна из существующих гипотез не включает гравитационное взаимодействие, а потому не может считаться завершенной теорией. Тем не менее, благодаря кваркам и кварковым моделям создана новая теория – квантовая хромодинамика, которая может послужить основанием для создания новой картины мира. Это утверждение не противоречит основному закону диалектики о познаваемости мира.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ФИЗИЧЕСКИЕ ТЕОРИИ. Взаимодействие – одно из основных понятий не только в физике, но и вообще в естествознании. Взаимодействие – причина всякого изменения. Несмотря на кажущееся их разнообразие в природе различают четыре типа взаимодействия: гравитационное, электромагнитное, сильное, слабое. Сопоставим специфические черты каждого (табл. 1), сравнив интенсивность, радиус действия, соотнеся каждый тип взаимодействия с объектом, который обусловлен данным типом взаимодействия.

Таблица 1

Признаки четырех типов взаимодействия

Типы взаимодействия	Относительная интенсивность	Радиус действия, м	Объекты, обусловленные данным взаимодействием
Сильное	1	10^{-15}	Ядра атомов
Электромагнитное	10^{-2}	∞	Атомы, молекулы
Слабое	10^{-5}	10^{-18}	Элементарные частицы
Гравитационное	10^{-39}	∞	Космические объекты

Названные типы взаимодействия отличаются степенью универсальности. Гравитационное взаимодействие проявляется у всех материальных объектов (от планет до элементарных частиц). Электромагнитное требует наличия электрического заряда или магнитного момента. Сильное взаимодействие проявляется у частиц, получивших название адронов (мезоны, барионы), но не у лептонов. Слабым взаимодействиям подвержены и адроны, и лептоны.

Каждый тип взаимодействия осуществляется через соответствующее физическое поле. Переносчики взаимодействия – кванты этих полей – элементарные частицы. У электромагнитного – фотоны, у ядерного – глюоны, Пи-мезоны, у слабого – промежуточные бозоны (W^+ ; W^- ; W^0). У гравитационного взаимодействия предполагаемый переносчик энергии – гравитон (пока не обнаружен).

Сфера проявления того или иного типа взаимодействия обусловлена структурными уровнями материи, формами её движения, пространственными областями. Все это в совокупности и определяет многообразие явлений материального мира, важнейшие свойства его объектов. Фундаментальные взаимодействия и фундаментальные физические теории соподчинены и взаимосвязаны. Различают динамическое и статическое проявления взаимодействия. При первом изменяется характер движения тел или микрочастиц. Второе (статическое) приводит к образованию устойчивых систем (электроны и ядра образуют атомы; протоны и нейтроны – ядра атомов; атомы и молекулы – тела и др.).

В классической механике и молекулярно-кинетической теории переносчиками взаимодействия являются поля – гравитационное и электромагнитное. Энергия взаимодействия определяется неравенством $E \ll mc^2$. Основными материальными объек-

тами служат классические объекты, тела на Земле, частицы вещества (атомы, молекулы), заряженные частицы (ядра атомов, электроны, ионы).

В классической электродинамике взаимодействие осуществляется через электромагнитное поле. В области релятивистской физики энергия тел и частиц сравнима с энергией покоя. Этот тип взаимодействия обусловлен взаимосвязями электрических частиц и электромагнитного поля. Электромагнитное и гравитационное взаимодействие проявляет себя на расстояниях 10^{20} – 10^{-8} м. **Квантовая механика** изучает физические явления, обусловленные движением электронов в атомах и молекулах. Основной тип взаимодействия частиц – электромагнитное. Энергия частиц сравнима с энергией покоя. Диапазон расстояний, в которых осуществляется этот тип взаимодействия микрочастиц, составляет 10^{-10} – 10^{-15} м. Квантовая электродинамика описывает взаимодействие электронов и фотонов. Электромагнитное взаимодействие частиц осуществляется в пространственной области, составляющей 10^{-10} – 10^{-18} м. Энергия взаимодействия частиц превышает энергию их покоя. **В квантовой теории элементарных частиц и поля** область пространства 10^{-13} – 10^{-15} м соответствует ядру атома. В ней действуют электромагнитное, сильное и слабое взаимодействия. Энергия связи нуклонов в ядре составляет 1–10 (МэВ). Этот тип взаимодействия обуславливает устойчивость и распад ядра.

Взаимные превращения элементарных частиц описывает **теория элементарных частиц**. Основные типы взаимодействия, характеризующие названные процессы (электромагнитные, сильные и слабые) проявляются на расстояниях 10^{-15} – 10^{-18} м. Энергия этих частиц значительно превышает энергию их покоя. Иерархию типов взаимодействия, теории и пространственные взаимодействия представим наглядно и в совокупности (табл. 2).

Взаимосвязь фундаментальных взаимодействий и теорий

Пространственная область, м	Типы взаимодействий	Типичные физические явления	Физическая теория
$10^{20} - 10^{-8}$	Гравитационное и электромагнитное	Движение планет, тел на Земле, молекул и атомов в телах	Классическая механика, молекулярно-кинетическая теория
$10^{-10} - 10^{-15}$	Электромагнитное	Движение электронов в атоме	Квантовая механика
$10^{-10} - 10^{-18}$	Электромагнитное	Взаимодействие электронов и фотонов	Квантовая электродинамика
$10^{-13} - 10^{-18}$	Электромагнитное, сильное и слабое	Устойчивость и распад ядра, взаимные превращения	Квантовая теория элементарных частиц и поля

Методологический анализ фундаментальных взаимодействий позволил выделить общие структурные элементы, определяющие характерные черты того или иного типа взаимодействия:

- происхождение;
- способ передачи;
- характер протекания;
- интенсивность;
- мера;
- подчинение общим законам и принципам.

Рассмотрим содержание всех структурных элементов различных взаимодействий, обобщив их в соответствии с выделенными признаками (табл. 3).

Таблица 3

Сравнительный анализ типов взаимодействий

Структурные элементы взаимодействия	Гравитационное	Электромагнитное	Сильное	Слабое
1. Происхождение	Наличие любых материальных объектов	Наличие электрического заряда или магнитного момента	Наличие адронов (мезонов, барионов)	Наличие кварков и лептонов
2. Способ передачи	Гравитон (не обнаружен)	Фотон	Глюон (8 типов)	Промежуточные бозоны (W^+ ; W^- ; Z^0)
3. Характер протекания	Взаимное притяжение	Взаимное притяжение и отталкивание. Поглощение или излучение энергии	Обмен пионами, сильное притяжение. Взаимодействие (притяжение и отталкивание)	Распадное взаимодействие
4. Интенсивность (относительная)	Сверхслабое 10^{-39}	10^{-2}	1	10^{-5}
5. Мера	Сила: $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ Потенциальная энергия: $\Pi = -G \frac{m_1 m_2}{r}$	Сила: $F_K = K \frac{q_1 q_2}{r^2}$ $\vec{F}_d = q \vec{E} + q [\vec{v} \vec{B}]$ Напряжённость поля: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$	Энергия связи ядра: $E = \Delta m c^2$	

Структурные элементы взаимодействия	Гравитационное	Электромагнитное	Сильное	Слабое
5. Мера (продолжение)	<p>Напряжённость поля:</p> $g = G \frac{m}{r^2}$ <p>Потенциал поля тяготения:</p> $\varphi = -G \frac{m}{r}$	<p>Разность потенциалов:</p> $\Delta\varphi_{12} = \frac{A_{12}}{q_0} = \frac{\Delta\Pi_{12}}{q_0}$ <p>Потенциал данной точки поля:</p> $\varphi = k \frac{q}{r}$ <p>Межмолекулярная потенциальная энергия:</p> $u(r) = \frac{A}{r^n} - \frac{B}{r^m}$ $n \approx 6; m \gg 12$	<p>Энергия кванта взаимодействия:</p> $E = h\nu$ <p>Удельная энергия связи ядра</p> $\varepsilon = \frac{E}{A}$	<p>Энергия кванта поля – промежуточного бозона</p>
6. Подчинение – общим законам	<p>Сохранения массы, импульса, энергия</p>	<p>Сохранения заряда, энергии, импульса</p>	<p>Сохранения барионного заряда</p>	<p>Сохранения лептонного заряда</p>
– принципам	<p>Близкодействие, суперпозиция, причинность</p>	<p>Близкодействие, суперпозиция</p>	<p>Причинность, близкодействие, неопределённость, суперпозиция</p>	<p>Близкодействие, неопределённость, дополнительность, суперпозиция</p>

В заключение необходимо отметить, что процессу взаимодействия свойственны общие признаки:

- наличие как минимум двух взаимодействующих объектов;
- наличие поля;
- наличие силы (меры взаимодействия);
- изменение состояния взаимодействующих объектов.

Характер взаимодействия определяет причины и механизм изменения состояния материального объекта, в рамках фундаментальных физических теорий – идеализированного объекта.

СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ТЕОРИЙ. Существующие научные теории можно классифицировать по разным основаниям. Различают **неформализованные** (интуитивные) и **формализованные** теории, т.е. теории, изучающие объекты (материальные и идеальные) с помощью операций, правил, задаваемых системой знаков.

С точки зрения законов логики, все теории можно классифицировать как **дедуктивные** и **недедуктивные**. В дедуктивных теориях тезис, являющийся единичным или частным суждением, подводится под общее правило. Здесь истинность посылок полностью переносится на истинность заключения. К таким теориям относятся математические, в них все теоремы получаются с помощью дедукций и аксиом. Естественнонаучные теории – гипотетико-дедуктивные. В отличие от математической физическая аксиоматика опирается не только на абстрактные объекты, но и на данные эксперимента. Термины физических концептуальных систем – это понятия, наделенные физическим смыслом. Существующие теории можно разделить на **логику-математические** (формальные, абстрактные) и теории, которые исследуют конкретный эмпирический материал. Они широко опираются на опыт и используют эмпирические методы исследования, поэтому такие теории нередко называют содержательными, конкретными и даже описательными. По глубине проникновения в сущность исследуемых явлений научные теории делятся на **феноменологические** и **микро-**

скопические. Такая классификация отражает степень зрелости соответствующей теории. Если теория ограничивается объяснением эмпирически наблюдаемых фактов, а глубина познания в них не идет дальше сферы явлений, то такие теории можно отнести к феноменологическим. История физики показывает, что возникновение физических теорий начиналось, как правило, с неясных и зачастую смутных представлений, которые затем уточнялись, развивались и углублялись, при этом сама теория из класса феноменологической переходила в разряд завершенных, полностью достроенных – становилась микроскопической. Таким образом, между феноменологическими, систематизированными теориями и теориями микроскопическими, раскрывающими механизм исследуемых процессов, существует закономерная связь.

Наконец, различают фундаментальные и прикладные теории. **Фундаментальная** физическая теория признается основной и ведущей формой современного знания в логико-философских исследованиях. Эти теории составляют основу знаний, на которых стоят прикладные физические и технические науки. Хотелось бы заметить, что не всегда можно провести четкие границы между фундаментальными и прикладными теориями.

Например, фундаментальная теория, характеризуемая рядом признаков, имеет: свою предметную область исследования со специфическими видами материи и формами ее движения (модель материи и взаимодействия); основные понятия и величины, специфические для данной теории; принципы; систему независимых аксиом (уравнений). Наконец, фундаментальная теория может описывать совокупность большого числа явлений, процессов, частных законов, предсказывать новые.

Руководствуясь указанными признаками, в школьном курсе физики можно выделить следующие фундаментальные физические теории: классическая механика, молекулярно-кинетическая теория строения вещества, электродинамика (теория электромагнитного поля, специальная теория относительности, электронная

теория вещества); квантовая физика (нерелятивистская квантовая механика, квантовая электродинамика). Несмотря на различия физических теорий, на специфические особенности законов, выражающих связи между физическими величинами, в строении физической теории можно выделить общие особенности, сходные элементы и аналогичные связи между ними.

Если теория развитая, завершенная, то в ней присутствуют следующие компоненты (структурные элементы):

- эмпирические предпосылки теории, ее **основание**. Основанием любой теории служат: основные понятия и величины; факты (экспериментальные и теоретические); модели материальных объектов и взаимодействия;

- исходный теоретический базис, или **ядро** теории, составляют фундаментальные законы, система принципов и математических уравнений;

- **следствие** включают в себя объяснение известных явлений, предсказание новых, количественные и качественные выводы. Достоинства любой теории оцениваются тем выше, чем шире круг явлений, которые она может объяснить, чем разнообразнее объекты, которые она своими объяснениями объединяет.

Возникновение любой теории связано с появлением фактов, таких, которые вступают в конфликт с основными положениями прежней теории. Эти факты постепенно систематизируются, при этом появляется новый понятийный аппарат. Чтобы перейти от эмпирического базиса теории (фактов теоретических и экспериментальных) к понятийной основе (совокупности новых понятий), вводится **идеализированный объект теории** (абстрактная модель). Он обладает общими свойствами, простой структурой, иногда идеализированный объект играет роль **фундаментальной идеи** всей теории. Например, в классической механике идеализированным объектом служит материальная точка, в молекулярно-кинетической теории газа – идеальный газ, в теории электромагнитного поля – непрерывное электромагнитное поле, в специальной теории относительности – пространство-время, в квантовой физике – модель микрообъекта.

Все модели обладают простой структурой, изучение их можно вести по обобщенному плану, который включает в себя следующие вопросы:

- определение понятия;
- обоснование необходимости введения понятия;
- допущения, задающие свойства идеализированного объекта;
- методологическая основа понятия;
- свойства идеализированного объекта;
- физические величины, описывающие свойства идеализированного объекта.

Раскрывая содержание отдельных пунктов обобщенного плана, необходимо отметить:

- идеализированный объект теории – это концептуальное образование, которое заменяет материальный объект, воспроизводя его свойства;
- сложность отдельных объектов, невозможность непосредственного наблюдения микрочастиц, их движения и взаимодействия приводят к замене материальных объектов более простыми, которые **приблизительно** отражают существенные свойства реальных объектов;
- идеализированный объект не тождествен реальному объекту; вместе с тем, выделенные определенные его свойства соответствуют свойствам реальной системы;
- методологическую основу идеализированного объекта составляет совокупность принципов об атрибутивных свойствах материи, о законах ее движения, способах существования;
- понятия, теории служат характеристикой определенного свойства идеализированного объекта или его аспекта. Эти характеристики называют физическими величинами. Так как физические величины вводятся в теорию как характеристики идеализированного объекта, то поэтому сами они являются абстракцией. Сопоставить их с реальными объектами можно через процедуру измерения. В процессе измерения устанавливаются количественные

характеристики свойств материального объекта. Последнее подчеркивает огромную роль эксперимента в процессе формирования теории.

Как уже отмечалось, с введением идеализированного объекта уточняется система фундаментальных понятий, разрабатываются новые. Первые догадки о свойствах объектов имеют форму суждений. Совокупность суждений об отличительных, общих и существенных признаках объекта, явления получило название «**понятие**». Все физические величины являются понятиями. Их можно поделить на две группы: измеряемые на опыте (наблюдаемые) и ненаблюдаемые.

Совокупность всех вышеперечисленных элементов теории, которые тесно связаны между собой, и составляет её **основание**.

Любая физическая теория имеет свою фундаментальную идею, положение, то есть свой принцип (совокупность принципов). Он подчиняет себе все другие элементы знания (теории). Вместе с тем, каждый элемент теории раскрывает сущность этого принципа, образуя стройную её систему. В классической механике такой принцип (инерция) сформулирован Г. Галилеем, он объединил вокруг себя все понятия, законы механики. В термодинамике таким принципом служит положение о невозможности построения вечного двигателя первого и второго рода.

Важным структурным элементом теории, входящим в ядро, является закон. Он устанавливает всеобщие существенные связи между явлениями, свойствами предметов.

Принципы, законы, математические уравнения и формулы составляют базис теории, т.е. её ядро. Если при переходе от основания к ядру теории большое значение имеет интуиция ученого, воображение, соотнесенное с объективной реальностью, то при переходе от ядра теории к следствию широко используются строгие выводы, подчиненные определенным математическим правилам. Объяснение совокупности известных фактов, явлений, предсказание новых составляет основу третьего структурного элемента тео-

рии – следствия. Представим во взаимосвязи все структурные элементы теории. Соотнесем фундаментальные физические теории с картинами мира (рис. 1.1).

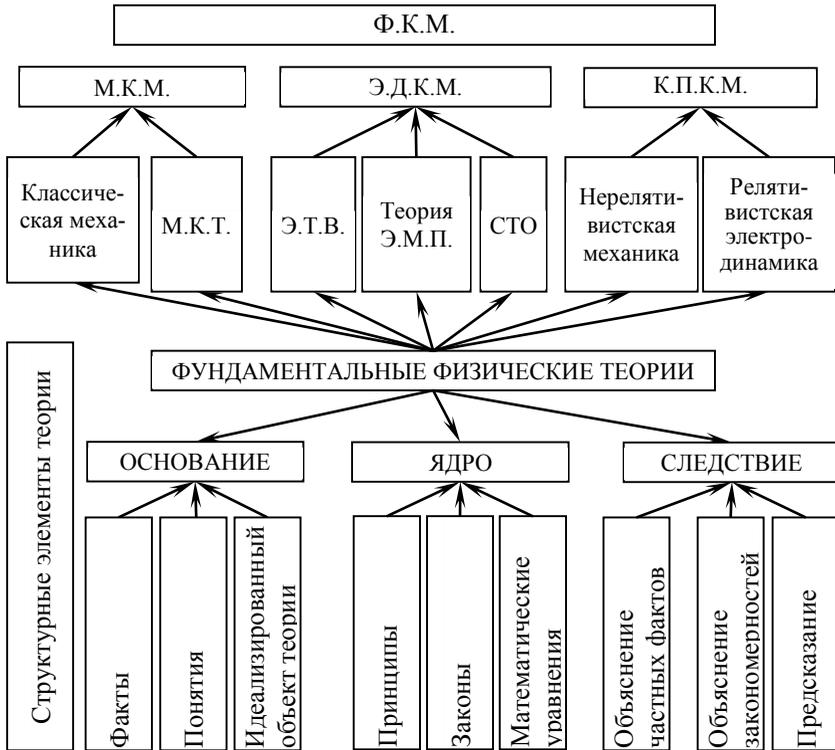


Рис. 1.1. Структурные компоненты фундаментальных физических теорий
 М.К.Т. – молекулярно-кинетическая теория
 Э.Т.В. – электронная теория вещества
 Э.М.П. – электромагнитное поле
 СТО – специальная теория относительности
 М.К.М. – механическая картина мира
 Э.Д.К.М. – электродинамическая картина мира
 К.П.К.М. – квантово-полевая картина мира

Анализируя содержание основания, ядра и следствия фундаментальных физических теорий в школьном курсе физики, можно осуществить генерализацию знаний.

ЧАСТЬ I. КЛАССИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

Развитие классической механики. Механика как наука начинает развиваться с конца XVI столетия, особенно бурно в первой половине XVII века. Основы классической механики закладываются выдающимся итальянским ученым Г. Галилеем (1564–1642). Он опубликовал «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местным движениям» (1638). Под двумя отраслями науки он имел в виду динамику и сопротивление материалов. Книга разделена на шесть частей, третья часть посвящена анализу кинематических закономерностей движения. Она рассматривает простые задачи механики: свободное падение тел; движение тела, брошенного под углом к горизонту; движение тел по наклонной плоскости. Г. Галилей изучает характер и особенности равномерного и равноускоренного движения, записывает основные уравнения этих движений. Главные методы исследований: эксперимент, мысленный эксперимент, теоретические обобщения. Галилей впервые вводит в физику принципы инерции, относительности. Доказав, что тело, брошенное под углом к горизонту, движется по параболе, он пытается обосновать принцип независимости движения тел. Глубоко и основательно Г. Галилей разработал основные законы колебания маятника, окончательно опровергнув утверждение Аристотеля о зависимости скорости падения тел от их масс. Он экспериментально доказывает, что воздух имеет вес, а поэтому принадлежит к обычным «весомым» телам, предлагает метод определения плотности воздуха. Г. Галилей разрабатывает науку о сопротивлении материалов. Его по праву (вместе с И. Ньютоном) считают основоположником классической механики.

Большой вклад в развитие классической механики внес немецкий астроном И. Кеплер (1571–1630). Он вошел в историю

науки как «законодатель неба». Им впервые опровергнуты ошибочные положения Аристотеля и Птолемея о круговых равномерных движениях планет. Кеплер сформулировал (1609) два закона движения планет:

1. Орбита любой планеты есть эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце.

2. Планеты, приближаясь к Солнцу, движутся быстрее, скорости движения каждой соотносятся между собой так, что площади, описанные в одно и то же время прямой, соединяющей Солнце с планетой, равны.

3. Квадраты времени обращения планет вокруг Солнца пропорциональны кубам их средних расстояний до Солнца.

Третий закон Кеплера окончательно утвердил систему Коперника (гелиоцентрическая система). Все его законы сыграли очень важную роль в открытии закона всемирного тяготения (И. Ньютон). Так, второй закон Кеплера помог установить, что сила, действующая на планету, является центральной, ее направление проходит через центр Солнца. Из первого закона Кеплера следует, что сила притяжения планет к Солнцу изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния. Третий закон подчеркивает единство сил, управляющих движением всех планет солнечной системы.

Классическая механика – самая ранняя физическая теория, получившая свое завершение с выходом в свет работы И. Ньютона «Математические начала натуральной философии» (1676). В этой работе И. Ньютон сформулировал основные принципы и законы механики, вложив тем самым в руки ученых мощный инструмент познания мира. Использование законов Ньютона на практике позволило решать любые задачи механики, что привело к ее бурному развитию. Успехи механики привели к созданию механической картины мира, которая, с одной стороны, являлась триумфом механики, а с другой – была тормозом развития физики в целом, поскольку ученые пытались все явления объяснить

на основе законов механики. Но тем не менее классическая механика сыграла положительную роль в развитии физики. Её положения и законы находят огромное практическое применение в нашей повседневной жизни. Почти вся современная техника, сооружения, транспорт, космическая техника создаются и работают, опираясь на законы классической механики. Например, используя закон всемирного тяготения Ньютона, астрономы предсказывают солнечные затмения или движение планет на десятки и сотни лет вперед с точностью до десятых долей секунды.

Механика – это раздел физики, в котором изучаются закономерности механического движения и равновесия макроскопических материальных тел. Механическим движением называют изменение положения тел или их частей друг относительно друга в пространстве и во времени. Механическое движение – это простейшая форма движения материи. Все другие более сложные формы движения (молекулярно-тепловое, электромагнитное, внутриатомное и т.д.) содержат в себе механическое движение, но не сводятся к нему. Поэтому целесообразно вначале изучить законы механического движения.

Основу механики составляют три основных раздела: кинематика, динамика и статика. Кинематика изучает закономерности различных видов механического движения, не рассматривая причины движения. Динамика устанавливает связь между характером движения и причинами, вызывающими изменения движения (силами). Статика рассматривает условия равновесия тел.

Материальная точка – идеализированный объект теории. Различают три вида механического движения: поступательное, вращательное и колебательное.

При поступательном движении все точки тела движутся совершенно одинаково: прямая, соединяющая две любые точки тела, перемещается параллельно самой себе. Поэтому при описа-

нии поступательного движения достаточно знать движение одной точки. При вращательном движении все точки тела движутся по концентрическим окружностям, центры которых лежат на одной прямой, называемой осью вращения. При колебаниях движение всех точек тела через равные промежутки времени повторяются. Во всех этих случаях можно описать законы движения, рассматривая тело как материальную точку. Материальной точкой называют тело, размерами которого можно пренебречь по сравнению с масштабом движения. Это абстракция. В природе нет материальных точек, но такое допущение упрощает задачу изучения движения тел, потому что не учитывает форму и размеры тела. Именно введение идеализированного объекта – материальной точки – позволило упростить решение многих задач классической механики.

1. За материальную точку может быть принято тело, размеры которого малы по сравнению с расстоянием, на котором оно находится от другого. Или за материальную точку может быть принято тело в том случае, когда расстояние, проходимое точками тела, велико по сравнению с его размерами.

2. Материальная точка – модель, данная для обозначения объективной реальности. Она находится в многообразных отношениях с другими материальными точками (объектами). Сохранение материи в процессах ее движения (изменения) приводит к сохранению фундаментальных величин, характеризующих свойства материальной точки: массы, энергии, импульса. Сохранение материи и движения находит свое выражение в различных формах симметрии (перенос, поворот, зеркальное отражение тел в пространстве). Устойчивость материальных объектов связана с сохранением материи. Эта устойчивость динамична.

3. Материальная точка обладает инертностью, гравитацией, относительностью движения. При взаимодействиях проявляются принципы дальнего действия, суперпозиции, причинности. Важнейшими динамическими величинами, характеризующими

свойства материальной точки, являются: масса, импульс, сила, импульс силы, энергия, а кинематическими величинами – перемещение, координата, скорость, ускорение.

Оперируя понятием «материальная точка», необходимо помнить, что всякая абстракция имеет границы своей применимости в зависимости от условий задачи. Например, Землю можно считать материальной точкой, рассматривая ее движение вокруг Солнца, но, изучая движение искусственных спутников Земли, ее уже нельзя принимать за материальную точку.

Понятия и физические величины кинематики. Понятия теории являются характеристиками определенного свойства идеализированного объекта или его аспекта. Эти характеристики называются физическими величинами. Так как физические величины вводятся в теорию как характеристики идеализированного объекта, то поэтому сами они являются абстракцией. Соотнести их с реальными объектами можно через процедуру измерения. В процессе измерения устанавливаются количественные характеристики свойств материального объекта. Последнее подчеркивает огромную роль эксперимента в процессе изучения теории.

Рассмотрим основные понятия и физические величины кинематики: система отсчета, траектория, перемещение, скорость и ускорение.

Данные современной науки показывают, что пространство однородно (в нем нет особых точек), изотропно (нет особых направлений), а время однородно (любые явления протекают одинаково). Отсюда следует невозможность определения положения материальной точки относительно пространства. Но это можно сделать относительно какого-нибудь тела, находящегося в пространстве. Тело, относительно которого определяется положение всех других, называется телом отсчета. Системой отсчета называют систему координат, связанную с телом отсчета. На практике ее часто соотносят с Землей. Иногда удобно за систему

отсчета выбрать тело, движущееся относительно Земли, например, самолет или корабль.

Линия, описываемая движущимся телом в данной системе отсчета, называется траекторией. Из определения видно, что траектория – понятие относительное. Например, траектория груза, сброшенного с самолета в системе отсчета «самолет» – прямая, а относительно системы отсчета «Земля» – кривая, близкая к отрезку параболы.

Пусть материальная точка движется по произвольной криволинейной траектории (рис. 1.2). Положения точки в моменты времени t_1 и t_2 могут быть заданы радиус-векторами \vec{r}_A и \vec{r}_B . Вектором перемещения называют направленный отрезок, проведенный из начального в конечное положение точки:

$$\vec{\Delta r} = \vec{r}_B - \vec{r}_A. \quad (1.1)$$

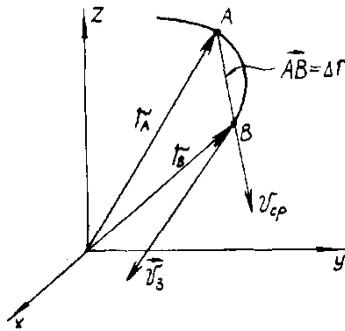


Рис. 1.2

Тогда средняя скорость определится как отношение вектора перемещения к промежутку времени, за которое это перемещение произошло:

$$\vec{v}_{cp} = \frac{\vec{r}_B - \vec{r}_A}{t_2 - t_1}. \quad (1.2)$$

Очевидно, что средняя скорость – вектор, совпадающий по направлению с вектором перемещения. Наиболее полно скорость

движения точки будет характеризовать мгновенная скорость – скорость за бесконечно малый промежуток времени:

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

В пределе при $\Delta t \rightarrow 0$ хорда (вектор перемещения) совпадает с касательной к кривой в данной точке. Следовательно, вектор мгновенной скорости направлен по касательной к траектории. Проекции вектора перемещения и вектора скорости на оси координат определяются следующими соотношениями:

- Движение с постоянной по величине скоростью называется равномерным, а переменным называют движение с изменяющейся скоростью.
- Характеристикой переменного движения является ускорение. Как и для скорости различают среднее ускорение (рис. 1.3):

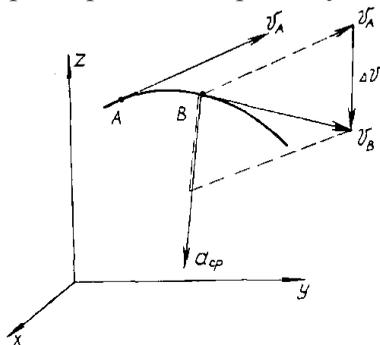


Рис. 1.3

$$\vec{a}_{cp} = \frac{\vec{v}_b - \vec{v}_a}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}. \quad (1.4)$$

и мгновенное ускорение:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}. \quad (1.5)$$

Мгновенное ускорение – физическая величина (векторная), являющаяся мерой изменения скорости и численно равная производной от вектора скорости по времени. Направление вектора

ускорения совпадает с направлением бесконечно малого изменения скорости $\Delta\vec{v}$, которое зависит от характера движения. При ускоренном движении \vec{a} положительно, направления скорости и ускорения совпадают. Угол, образованный вектором $\vec{a}_{\text{ср}}$ и касательной к траектории – острый. При замедленном движении $\Delta\vec{v}$ отрицательно (вектор ускорения направлен противоположно вектору скорости, угол между вектором $\vec{a}_{\text{ср}}$ и касательной к траектории движения – тупой). Если скорость по величине не меняется, то векторное ускорение направлено по нормали к траектории. Проекции ускорения на оси координат равны:

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2v_x}{dt^2}; \quad a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2v_y}{dt^2}; \quad a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2v_z}{dt^2}. \quad (1.6)$$

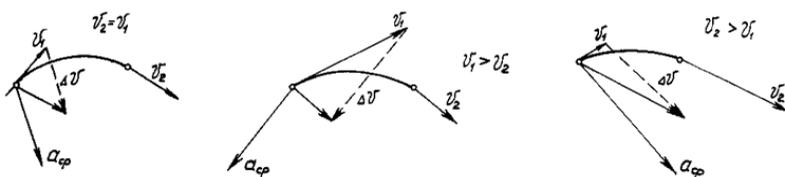


Рис. 1.4

Модуль ускорения может быть найден по формуле

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}. \quad (1.7)$$

При криволинейном движении скорость меняется по величине и направлению. Пусть в момент времени t_1 скорость имеет значение \vec{v}_1 , в момент времени t_2 – \vec{v}_2 . Изменение вектора скорости $\Delta\vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$ можно разложить на две составляющие (рис. 1.5):

$$\Delta\vec{v} = \Delta\vec{v}_t + \Delta\vec{v}_n,$$

где $\Delta\vec{v}_t$ характеризует изменение скорости по величине, а $\Delta\vec{v}_n$ – по направлению.

Следовательно, и в ускорении можно выделить две составляющие $\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_n$, где \vec{a}_t – тангенциальное ускорение, \vec{a}_n – нормальное ускорение. Найдем численные выражения для \vec{a}_t и \vec{a}_n .

При $\Delta t \rightarrow 0, \vec{v}_2 \rightarrow \vec{v}_1 \rightarrow 0, \hat{\alpha} \rightarrow 0, \widehat{M_1AC} \rightarrow 90^\circ$, тогда из треугольников AM_1C и OM_1M_2 имеем:

$$\frac{AC}{M_1M} = \frac{MA}{OM} \text{ или } \frac{\Delta v_n}{v\Delta t} = \frac{v}{R}; \frac{\Delta v_n}{\Delta t} = \frac{v^2}{R}; a_n = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_n}{\Delta t} = \frac{v^2}{R}.$$

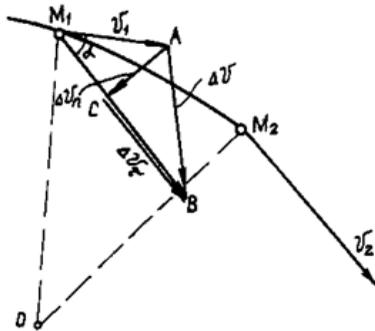


Рис. 1.5

Итак, тангенциальное ускорение

$$\vec{a}_t = \frac{d\vec{v}}{dt}. \quad (1.8)$$

характеризует изменение скорости по величине и направлено по касательной к траектории, нормальное ускорение

$$a_n = \frac{v^2}{R}. \quad (1.9)$$

характеризует изменение скорости по направлению к центру кривизны (рис. 1.6):

$$|\vec{a}| = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}. \quad (1.10)$$

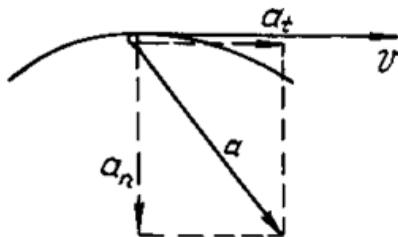


Рис. 1.6

В частных случаях:

1. $\vec{a}_n = 0$; $\vec{a} = \vec{a}_t$ – прямолинейное равноускоренное движение;
2. $\vec{a}_t = 0$; $\vec{a} = \vec{a}_n$ – равномерное движение по окружности.

Основные кинематические уравнения движения материальной точки. В кинематике решаются две задачи:

1. Задача: известны скорости и ускорения – найти кинематические уравнения движения (закон движения). Эта задача решается операцией интегрирования.

2. Задача: задан закон движения (кинематические уравнения) – найти скорости и ускорения. Эта задача решается путем дифференцирования уравнения движения.

Покажем на конкретных примерах решение этих задач.

Пример 1. Тело движется равномерно и прямолинейно. Найдите уравнение такого движения. Имеем $\vec{v} = \text{const}, \vec{a} = 0$. Определить $x = f(t)$. В этом случае вектор перемещения совпадает с траекторией движения. Пусть это будет прямая, совпадающая с осью X. Тогда:

$$v_x = \frac{dx}{dt}. \quad (1.11)$$

Интегрируя (1.11), получим закон движения:

$$\int_0^x dx = \int_0^t v_x dt; \quad x = v_x t. \quad (1.12)$$

Соотношение (1.12) – уравнение равномерного прямолинейного движения.

Пример 2. Тело движется прямолинейно и равноускорено. Отыскать уравнение движения.

Условие, $\vec{a} = \text{const}$, найти $x = f(t)$.

$$a_x = \frac{dv_x}{dt}. \quad (1.13)$$

Интегрируя (1.13), получим зависимость скорости от времени (закон изменения скорости):

$$\int_{v_{0x}}^{v_0} dx = \int_0^t a_x dt; v_x - v_{0x} = a_x t; v_x = v_{0x} + a_x t. \quad (1.14)$$

Интегрируя (1.14), получим закон движения:

$$\int_0^x dx = \int_0^t v_x dt = \int_0^t (v_{0x} + a_x t) dt = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}; x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}, \quad (1.15)$$

т.е. известное уравнение равнопеременного движения.

Пример 3. По известным уравнениям движения найти скорость и ускорение.

Пусть уравнения движения имеют вид:

$$x = R \sin \omega t; y = R \cos \omega t; z = 0. \quad (1.16)$$

Дифференцируя их, найдем скорость движения:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \omega R \cos \omega t; v_y = \frac{dy}{dt} = -\omega R \sin \omega t; v_z = 0. \quad (1.17)$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = \omega R \sqrt{\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t} = \omega R; v = \omega R. \quad (1.18)$$

Дифференцируя выражение (1.17), находим ускорение:

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = -\omega^2 R \sin \omega t; a_y = \frac{dv_y}{dt} = -\omega^2 R \cos \omega t; a_z = 0. \quad (1.19)$$

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} = \omega^2 R; a = \omega^2 R. \quad (1.20)$$

Найдем также вид траектории. Для определения траектории надо исключить из уравнения движения время. Для этого возведем уравнения (1.16) в квадрат и сложим:

$$x^2 = R^2 \sin^2 \omega t; \frac{x^2}{R^2} = \sin^2 \omega t; \quad (1.21)$$

$$y^2 = R^2 \cos^2 \omega t; \frac{y^2}{R^2} = \cos^2 \omega t; \quad (1.22)$$

$$\frac{x^2}{R^2} + \frac{y^2}{R^2} = 1 \text{ или } x^2 + y^2 = R^2. \quad (1.23)$$

Это уравнение окружности радиуса R .

От частных примеров перейдем к обобщениям. Представим все кинематические уравнения движения материальной точки в совокупности и во взаимосвязи. Для этого составим классификационную таблицу, позволяющую сравнить все виды механического движения: поступательное, вращательное, колебательное.

Наличие закономерных связей между скоростью, ускорением и временем движения материальной точки позволяет записать основные уравнения движения (криволинейного равноускоренного), не изучающегося ранее в средней школе (таблица 4).

ПОНЯТИЯ И ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ. Как было показано во введении, классическая механика раскрывает природу двух типов взаимодействия – гравитационного и электромагнитного. Если бы она, объясняя закономерности движения тел, всякий раз вскрывала природу взаимодействия, то это чрезвычайно усложнило бы ее задачи.

Гениальная заслуга Ньютона состоит в том, что он ввел понятие «сила». По Ньютону, сила – это обобщенная мера реальных взаимодействий. Поэтому вместо слов «тела взаимодействуют» можно сказать: «на тело действует сила». При этом мы отвлекаемся от природы силы, рассматривая только два проявления ее: изменение характера движения и деформацию тел. Другими словами, под действием сил тела приобретают ускорение или деформируются. Отсюда вытекают два способа измерения сил: либо измеряют ускорение, приобретенное телом, либо деформацию. Чаще используется второй способ – измерение деформации (пружинный динамометр). Сила векторная величина. Как всякий вектор, сила характеризуется численным значением и направлением. Кроме того, в механике важна и точка приложения силы. Например, на рис. 1.7 одна и та же сила в зависимости от точки приложения вызовет разные эффекты. Поэтому ввели еще одну физическую величину – **момент силы**. Он характеризует вращательное движение материальной точки и равен произведению силы на плечо силы. Плечо силы – это кратчайшее расстояние от оси вращения до линии, вдоль которой действует сила. Таблицу 4 дополним еще одной строчкой. Кинематические закономерности движения соотнесем с динамическими. Если материальная точка движется равномерно, то векторная сумма сил или векторная сумма моментов сил (криволинейные движения) равна нулю.

Движение с постоянным ускорением вызвано постоянной силой (равнодействующей сил) или в случае криволинейного движения постоянным моментом сил. При колебательном движении меняющееся по гармоническому закону ускорение обусловлено силой, которая тоже меняется по такому же закону.

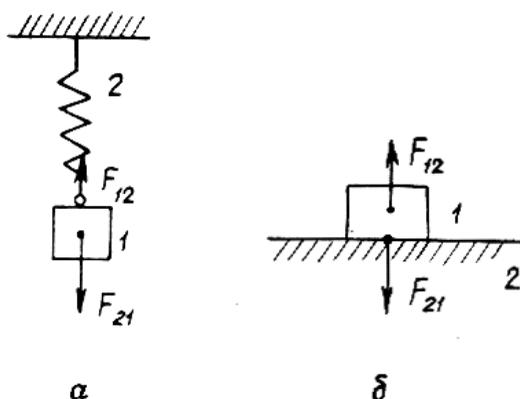


Рис. 1.7

Инерция – свойство тел сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. С другой стороны, все тела участвуют в гравитационном взаимодействии. Оба эти свойства и отражают понятие массы:

Масса – физическая скалярная величина, являющаяся мерой инертных и гравитационных свойств тел и численно равная отношению силы к ускорению.

Массу тел измеряют путем взвешивания: сравнивают силы притяжения Землей тела и эталона. Инертную массу можно определить по способности тел откликаться определенным ускорением на действие других тел. Сравнивая ускорения, приобретаемые телом и эталоном под действием одной и той же силы, изме-

ряют массу тела. Теория относительности А. Эйнштейна позволила сделать вывод о равенстве массы инертной и гравитационной.

Импульс – физическая векторная величина, являющаяся мерой механического движения и численно равная произведению массы на скорость. Понятие импульса удобно при рассмотрении вопросов передачи движения от одного тела к другому.

Все, что нас окружает, – это материя. Основное свойство материи – движение. Движение – способ существования материи. Нет движения без материи и нет материи без движения. **Единой мерой различных форм движения материи служит энергия.**

Мерой механического движения является механическая энергия. Выше мы называли мерой механического движения импульс. Здесь нет противоречия: и импульс, и энергия являются мерами движения. Понятие «импульс» удобнее использовать в случаях, когда нет перехода механического движения в другие формы движения (например, при упругих столкновениях). Если же при каких-то процессах происходит частичный или полный переход механического движения в другие формы движения (например, при всех процессах с трением), то тогда мерой движения служит энергия (как единая мера движения материи).

Механическая энергия – это кинетическая и потенциальная энергия. Кинетическая энергия есть функция скорости (равна половине произведения массы на квадрат скорости) и, следовательно, величина относительная. Кинетическая энергия одного и того же тела в разных системах отсчета различна. Потенциальная энергия – функция координат, она определяется взаимным расположением тел (например, положением тел относительно поверхности Земли) или взаимным расположением частей тела (например, различным состоянием пружины).

Изменения движения и энергии тела вызываются силами. Процесс изменения энергии тела под действием силы называется процессом совершения работы, а приращение энергии тела в этом

процессе называется работой определенной силы. Опыт показывает, что сила совершает работу только в том случае, если тело при этом перемещается.

Работа равна скалярному произведению силы на перемещение:

$$dA = \vec{F}d\vec{s}; A = \int \vec{F}d\vec{s}. \quad (1.24)$$

Если $\vec{F} = \text{const}$, то из (1.24) имеем: $A = F \cdot \Delta s \cdot \cos \alpha$, где Δs – перемещение, α – угол между силой и перемещением. При $\alpha < \pi/2$ $A > 0$, при $\alpha > \pi/2$ $A < 0$ и при $\alpha = \pi/2$ $A = 0$. (Например, равномерное движение точки по окружности под действием центральной силы).

Основные принципы механики. 1. Принцип инерции. Этот принцип имеет очень длинную историю. Со времен Аристотеля считалось, что причиной движения является сила, т.е. тело движется только в том случае, если на него действует другое тело. Казалось бы, повседневный опыт подтверждает это. Всякое движущееся на Земле тело останавливается. Почему? Этот вопрос задал себе Галилей. Почему телега после толчка останавливается, пройдя некоторое расстояние? Ее движение тормозят силы сопротивления (трение, неровности дороги). Галилей рассуждал примерно так: если смазать оси колес, телега пройдет большее расстояние, а если убрать неровности дороги – еще большее. И, наконец, Галилей делает гениальный шаг (мысленный эксперимент): а если не будет никаких сил сопротивления (что в условиях Земли сделать невозможно) – тогда ничто не мешает телеге двигаться вечно. Так Галилей подошел к формулировке принципа инерции: если на тело не действуют никакие силы, то оно сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.

Таким образом, тела движутся по инерции, а под действием сил происходит изменение характера движения – ускорение или замедление. Траектория движения и скорости зависят от системы

отсчета. Прямолинейное движение в одной системе может оказаться криволинейным в другой. Поэтому следует уточнить принцип инерции, указав системы отсчета, относительно которых рассматривалось движение.

2. Принцип относительности. Этот принцип возник из практической необходимости указать, относительно чего можно рассматривать движение какого-либо тела. Рассуждения привели Галилея к выводу, что механическое движение относительно, т.е. о движении тела можно говорить лишь тогда, когда указано, по отношению к какому телу происходит движение. Опыт показывает, что во всех инерциально движущихся системах отсчета все механические явления протекают одинаково. Это положение называется принципом относительности Галилея. Или еще его формулируют так: никакими механическими опытами невозможно определить равномерное прямолинейное движение системы, находясь внутри ее.

Механический принцип относительности в самой сжатой форме звучит так: все инерциальные системы отсчета эквивалентны с точки зрения законов механики.

А. Эйнштейн в 1905 году обобщил принцип относительности на все законы физики: все инерциальные системы эквивалентны.

3. Принцип независимости действия сил (принцип суперпозиции). Опыт показывает, что если на тело действует несколько сил, то действие каждой из них не зависит от наличия других сил. Это положение называют принципом независимости действия сил, или принципом суперпозиции (наложения). Этот принцип позволяет упрощать решение задач динамики: можно разложить силу на составляющие и рассматривать действие каждой из них отдельно или наоборот, несколько сил сложить (по правилу сложения векторов) и рассматривать действие одной равнодействующей силы.

Из принципа независимости действия сил вытекает, как следствие, принцип независимости движений: **если тело одновременно участвует в нескольких движениях, то результирующее перемещение равно векторной сумме перемещений, совершаемых телом в каждом из движений порознь.** Применение принципа независимости движений резко упрощает решение задач: сложное движение разлагается на ряд (чаще два) простых, и каждое из них рассматривается независимо от остальных.

4. Классический принцип причинности в механике устанавливает строго однозначное соответствие между причиной и следствием. Это означает, что если известен закон движения и начальные условия (координаты и скорости), то можно точно указать в любой момент времени, где находится материальная точка.

При этом и координаты, и скорость (импульс) точки могут быть определены с одинаковой степенью точности.

5. Один из основных законов механики – закон всемирного тяготения – сформулирован Ньютоном на языке дальнодействия. Согласно этому закону, любые объекты взаимно притягиваются на любых расстояниях. При этом предполагается, что скорость передачи взаимодействия бесконечна, т.е. взаимодействие осуществляется мгновенно. Такая концепция впоследствии получила название «принцип дальнодействия» классической механики.

Основные законы механики. Основу механики составляют три закона динамики Ньютона, закон всемирного тяготения и законы сохранения энергии и импульса.

Первый закон Ньютона является обобщением впервые сформулированного Галилеем принципа инерции. Он утверждает: существуют такие системы отсчета, в которых тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока действие сил не заставит его изменить это состояние.

Второй закон Ньютона устанавливает связь между силой, действующей на тело, ускорением, приобретаемым телом под действием данной силы, и массой тела.

Ускорение, приобретаемое телом под действием сил, прямо пропорционально векторной сумме сил и обратно пропорционально массе тела:

$$\vec{a} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \vec{F}_i. \quad (1.25)$$

Ньютон сформулировал второй закон динамики в более общем виде, оперируя понятием импульс: скорость изменения импульса тела пропорциональна действующей силе и совпадает с ней по направлению:

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \vec{F}. \quad (1.26)$$

Уравнение (1.26) применяется более широко, например, для решения задачи о движении тел с переменной массой. Соотношение (1.25) вытекает из (1.26) при условии $m = \text{const}$.

Третий закон Ньютона подчеркивает тот факт, что сила – это характеристика взаимодействия, что нет просто действия, всякое действие – взаимодействие.

Всякому действию есть равное и противоположно направленное противодействие:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}. \quad (1.27)$$

Уравнение (1.27) всегда логичнее записывать с двойными индексами (\vec{F}_{12} означает: сила, действующая на первое тело со стороны второго). В такой записи сразу видно, что силы действия и противодействия приложены к разным телам, поэтому не могут уравновесить друг друга, знак «минус» в векторном равенстве указывает на противоположное направление сил. Обозначим тело индексом «1», а подвес или опору индексом «2». Тогда становятся вполне понятными типичные примеры, показанные на рис. 1.7 (а, б).

Закон всемирного тяготения носит универсальный характер: он применим для всех объектов в природе.

Любые тела притягиваются с силой, прямо пропорциональной их массам и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:

$$F = G \frac{M_1 \cdot M_2}{R^2}, \quad (1.28)$$

$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$ постоянная тяготения (или гравитационная постоянная).

Такое малое численное значение гравитационной постоянной означает, что силы тяготения значительны только для больших масс. В микромире они практически не играют никакой роли, но очень существенны для космических объектов.

Уравнение (1.28) может быть записано в векторной форме и проиллюстрировано (рис. 1.8):

$$\vec{F}_{21} = -G \frac{M_1 \cdot M_2}{R^2} \cdot \frac{\vec{R}_{12}}{R} \text{ или } \vec{F}_{21} = -G \frac{M_1 \cdot M_2}{R^3} \vec{R}_{12}. \quad (1.29)$$



Рис. 1.8

Выше мы отмечали фундаментальные свойства пространства (однородность и изотропность) и времени (однородность). Из этих свойств пространства и времени как следствие вытекают фундаментальные законы, получившие название законов сохранения.

Следствием однородности времени является закон сохранения энергии. Полная механическая энергия замкнутой системы сохраняется:

$$\sum_{i=1}^n E_i = \text{const}; \quad \sum \Delta E_i = 0.$$

Система называется замкнутой, если тела, входящие в систему, не взаимодействуют с окружающей средой. Если система не замкнутая, то изменение полной механической энергии системы равно работе внешних сил:

$$\sum_{i=1}^n \Delta E_i = A.$$

(Внешние силы – силы взаимодействия тел системы с телами, не входящими в систему).

Примером незамкнутых систем являются все системы с трением. В таких системах изменение энергии равно работе сил трения.

Следствием однородности пространства является закон сохранения импульса.

Полный импульс замкнутой системы есть величина постоянная:

$$\sum_{i=1}^n \vec{P}_i = const; \quad \sum \Delta \vec{P}_i = 0. \quad (1.30)$$

На практике часто наблюдается такой случай, когда систему, в целом незамкнутую, можно считать замкнутой вдоль одного какого-либо направления (если внешние силы, действующие вдоль этого направления, малы и ими можно пренебречь).

Применение законов сохранения позволяет решать многие задачи динамики проще, чем на основе законов динамики.

Некоторые применения законов механики. Пример 1. Найти закон движения груза на нити, отклоненной на малый угол (рис. 1.9).

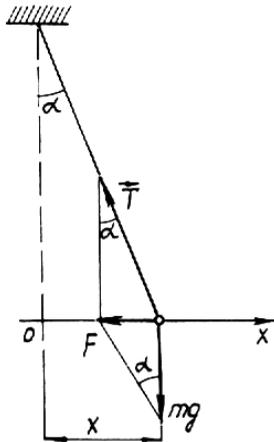


Рис. 1.9

На тело действуют две силы: сила тяжести ($m\vec{g}$) и сила натяжения нити (\vec{T}). Под действием этих сил тело будет двигаться с ускорением. Векторная сумма сил $m\vec{g}$ и \vec{T} сообщает телу ускорение:

$$\vec{a} = \frac{1}{m} (m\vec{g} + \vec{T}). \quad (1.31)$$

Проектируя (1.31) на ось x , получаем:

$$ma_x = -T \sin \alpha \quad (1.32)$$

или $m \frac{d^2x}{dt^2} = -T \sin \alpha$.

Проектируя (1.31) на ось y , получаем:

$$0 = mg - T \cos \alpha, \quad \text{отсюда } T = \frac{mg}{\cos \alpha}. \quad (1.33)$$

Если подставить (1.33) в (1.32), тогда:

$$ma_x = -mg \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (1.34)$$

Если $\operatorname{tg} \alpha \approx \frac{x}{l}$, где l – длина нити и x – смещение тела от положения равновесия, тогда (1.34) запишем:

$$ma_x = -mg \frac{x}{l}, \quad \text{или} \quad \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{g}{l}x.$$

Обозначив $\frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x}$, имеем:

$$\ddot{x} + \frac{g}{lx} = 0. \quad (1.35)$$

Решением уравнения (1.35) является уравнение вида:

$$x = x_m \cos \omega t, \quad (1.36)$$

где $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$.

В этом можно убедиться, если продифференцировать 1.36 дважды и подставить в 1.35. Уравнение 1.36 есть уравнение гармонического колебания. Принимая во внимание, что $\omega = \frac{2\pi}{T}$, период колебаний T (время одного полного колебания) определяется формулой:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (1.37)$$

Выражение под знаком \cos называется фазой. Фаза – пространственно-временная характеристика колеблющегося тела. Фаза – физическая величина, определяющая положение колеблющейся точки в пространстве и во времени. Если задана фаза (измеряемая в радианах) и начальные условия, то тем самым известно, где находится колеблющаяся точка и сколько времени прошло от начала колебания (в долях периода). Пусть, например, точка начала колебаться из положения 1 (рис. 1.10) по закону (1.36). Тогда ее положение в зависимости от фазы можно проиллюстрировать таблицей 4.

Таблица 4

Фаза	0	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3}{2}\pi$	2π	3π	4π	5π
Положение точки	1	2	3	2	1	1	2	2
Время (в долях T)	0	T/4	T/2	3/4T	T	T	6,5T	8 ³ /4T

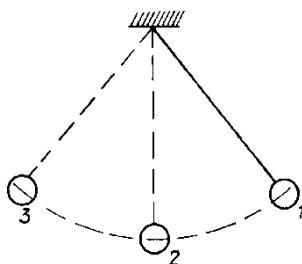


Рис. 1.10

Приведенный пример убедительно свидетельствует о том, что, зная положение материальной точки в пространстве, ускорение, с которым оно движется, можно найти уравнение движения тела, а потом определить параметры движения тела на все последующие промежутки времени. Это и есть механическая схема описания движения тел, присущая всей классической механике.

Пример 2. Определить среднюю плотность Земли, если ее радиус ~ 6400 км.

Учитывая, что сила тяжести обусловлена силой тяготения, имеем:

$$mg = G \frac{mM}{R^2}; M = \frac{gR^2}{G};$$

$$\bar{\rho} = \frac{M}{V} = \frac{gR^2}{G \frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{3g}{4\pi GR}; \bar{\rho} = 5,5 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Средняя плотность верхних слоев Земли $2,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Для объяснения этого факта выдвинуто предположение, что в центре Земли есть ядро, состоящее из металлов с плотностью $\sim 12 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Определите массу Солнца, зная расстояние от Земли до Солнца, $R = 1,5 \cdot 10^6$ км, а период обращения Земли 1 год.

Пусть m – масса Земли, M – масса Солнца. Земля вращается вокруг Солнца по почти круговой орбите. Поэтому сила тяготения является центростремительной силой:

$$f_{\Gamma} = f_{\text{ц}}; G \frac{Mm}{R^2} = \frac{(mv^2)}{R}; v = \frac{2\pi R}{T}.$$

тогда $G \frac{M}{R} = \frac{4\pi^2 R^2}{T^2}; M = \frac{4\pi^2 R^3}{GT^2}.$

Расчеты показали, что $M = 1,98 \cdot 10^{30}$ кг.

Законы динамики позволяют рассчитать многие физические величины, характеризующие движение материальных точек (тел), а также их свойства (масса, плотность).

Пример 3. Санки скатываются с ледяной горы высотой 20 м и останавливаются на ледяном поле, пройдя 200 м от вершины горы. Найти коэффициент трения.

Используем закон сохранения энергии для неизолированных систем: изменение энергии равно работе внешних сил (в данном случае силы трения):

$$E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = A$$

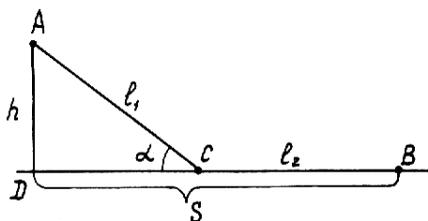


Рис. 1.11

В т. А $E_K = 0, E_{\Pi} = mgh$; в т. В $E_K = E_{\Pi} = 0$, следовательно, потенциальная энергия израсходована на преодоление сил трения:

$$\begin{aligned} mgh &= A_{\text{тр}}^1 + A_{\text{тр}}^2 = \mu mg \cos \alpha l_1 + \mu mgl_2 \\ l_1 \cos \alpha &= l; l + l_2 = S \\ mgh &= \mu mgS; \mu = \frac{h}{S}. \end{aligned}$$

Пример 4. Движение тел переменной массы. В окружающей жизни наблюдается много случаев движения тел с переменной массой: метеориты, льдины, самолет, ракета, поливальная машина и т.д.

Получим уравнение движения тела переменной массы на примере одноступенчатой ракеты. Предположим, что центр тяжести не перемещается. Будем рассматривать ракету как материальную точку.

Обозначим массу ракеты в момент времени t — M , скорость ее относительно Земли \vec{v} . За время Δt от ракеты отделилась масса $(-\Delta M)$ со скоростью \vec{u} (относительно Земли).

Пусть \vec{F} — равнодействующая всех внешних сил (силы тяжести, сил сопротивления). При отделении $(-\Delta M)$ возникает реактивная сила \vec{F}_p , которая для системы ракета–газы является внутренней. Чтобы исключить ее из рассмотрения, воспользуемся законом изменения импульса (вторым законом Ньютона) — рис. 1.12:

$$\frac{d(M\vec{v})}{dt} = \vec{F} \quad (1.38)$$

или для конечных приращений:

$$\Delta(M\vec{v}) = \vec{F} \Delta t. \quad (1.39)$$

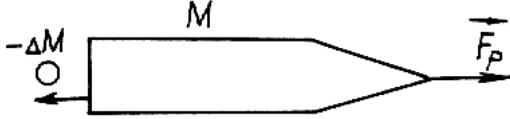


Рис. 1.12

Пусть в момент времени t импульс ракеты $\vec{P}_0 = M\vec{v}$. Через промежуток времени Δt импульс будет $\vec{P} = [M - (-\Delta M)](\vec{v} + \Delta\vec{v}) + (-\Delta M)\vec{u}$. Изменение импульса за Δt : $\vec{\Delta P} = \vec{P} - \vec{P}_0 = [M - (-\Delta M)](\vec{v} + \Delta\vec{v}) + (-\Delta M)\vec{u} - M\vec{v} = M\vec{v} + \Delta M\vec{v} + M\Delta\vec{v} + \Delta M\Delta\vec{v} - \Delta M\vec{u} - M\vec{v} = \vec{v}\Delta M - \vec{u}\Delta M + M\Delta\vec{v} = (\vec{v} - \vec{u})\Delta M + M\Delta\vec{v}$.

При расчете пренебрегаем произведением двух малых величин $(\Delta M \cdot \Delta\vec{v})$. На основании (1.39) имеем:

$$M\Delta\vec{v} + (\vec{v} - \vec{u})\Delta M = \vec{F}\Delta t$$

или, переходя к бесконечно малым величинам и обозначая $(\vec{u} - \vec{v}) = v_{\text{отн}}$ скорость газов относительно ракеты, получим:

$$M \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} + (\vec{u} - \vec{v}) \frac{dM}{dt}; \quad M \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} - \vec{v}_{\text{отн}} \frac{dM}{dt}. \quad (1.40)$$

Уравнение (3) называется уравнением И.В. Мещерского. Оно описывает движение тел переменной массы. Величина $\vec{F}_p = \vec{v}_{\text{отн}} \frac{dM}{dt}$ есть не что иное, как реактивная сила. Ее значение зависит от скорости газов относительно ракеты ($\vec{v}_{\text{отн}}$) и от скорости изменения массы $\frac{dM}{dt}$.

Воспользуемся уравнением Мещерского для определения максимальной скорости, которой может достичь ракета. Вдали от Земли ракета движется только под действием реактивной силы ($\vec{F} = 0$). Тогда из (1.40)

$$M \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{v}_{\text{отн}} \frac{dM}{dt}.$$

Разделим переменные и проинтегрируем (предварительно сократив на dt).

$$\int_0^v dv = - \int_{M_0}^M v_{\text{отн}} \frac{dM}{M} = -v_{\text{отн}} \int_{M_0}^M \frac{dM}{M} = v_{\text{отн}} \int_M^{M_0} \frac{dM}{M}; v = v_{\text{отн}} \ln \frac{M_0}{M}. \quad (1.41)$$

Последнее выражение называется формулой К.Э. Циолковского. Из формулы следует, что максимальная скорость ракеты зависит от $v_{\text{отн}}$ и отношения начальной массы ракеты к конечной (когда все топливо сгорело). Расчет (пусть $v_{\text{отн}} = 2$ км/с, $M_0/M = 10$. Тогда $v = 2 \cdot \ln 10 = 2 \cdot 2,3$, $lg 10 = 4,6$ км/с) по формуле (4) показывает, что одноступенчатая ракета не сможет развивать первую космическую скорость (7,9 км/с). Поэтому Циолковский предложил многоступенчатые ракеты.

Пример 5. Законы сохранения импульса и энергии в механике. Рассмотрим замкнутую систему. Если векторная сумма всех внешних сил равна нулю, то $\Delta(m\vec{v}) = 0$, а $mv = \text{const}$, т.е. импульс тела в такой системе сохраняется. Рассмотрим подробно эту ситуацию на основе законов динамики. Если в замкнутую систему входят два взаимодействующих тела, то $\Delta(m_1\vec{v}_1) = \vec{F}_1\Delta t$; $\Delta(m_2\vec{v}_2) = \vec{F}_2\Delta t$, умножив левую и правую части уравнения на минус единицу и используя третий закон Ньютона, $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$, учитывая тот факт, что время действия равно времени противодействия, получим $\Delta(m_1\vec{v}_1) = -\Delta(m_2\vec{v}_2)$ или $\Delta(m_1\vec{v}_1) + \Delta(m_2\vec{v}_2) = 0$.

Обобщив эти выводы на n число взаимодействующих тел, запишем

$$\sum_{i=1}^n \Delta(m_i\vec{v}_i) = 0 \text{ или } \sum_{i=1}^n (m_i\vec{v}_i) = \text{const}. \quad (1.42)$$

Уравнения (1) являются математическим выражением закона сохранения импульса.

Используя аналогичный подход, получим закон сохранения механической энергии на основе законов динамики. Пусть

скорость тела меняется от \vec{v}_1 до \vec{v}_2 , изменение скорости $\Delta\vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$. Среднее значение скорости $\vec{v}_{cp} = \frac{1}{2}(\vec{v}_2 + \vec{v}_1)$. Умножим обе части равенства $m\Delta\vec{v} = \vec{F}\Delta t$ на \vec{v}_{cp} , получаем $m\vec{v}_{cp}(\vec{v}_2 - \vec{v}_1) = \vec{F}\Delta t \cdot \vec{v}_{cp}$. Если система замкнутая, а векторная сумма всех внешних сил равна нулю, тогда:

$$\frac{1}{2}(mv_1 + mv_2)(v_2 - v_1) = 0; \quad \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = 0; \quad \frac{mv_2^2}{2} = \frac{mv_1^2}{2}. \quad (1.43)$$

Соотношение (1.43) выражает закон сохранения механической (кинетической) энергии в замкнутой системе.

Рассмотренный пример убедительно свидетельствует о том, что на основе законов Ньютона можно получить более общие – законы сохранения.

Пример 6. Соударение тел и частиц (упругий и неупругий удар). Задача об ударе имеет большое значение в различных областях науки и техники. Например, когда И.В. Курчатов выбирал вещество в качестве замедлителя нейтронов, он остановился на графите. Масса нейтрона – m_1 . Если взять замедлителем атомы тяжелых элементов, то нейтрон будет отлетать от них, как от стенки, без потери скорости. Если легкие атомы, то нейтрон обменяется с ними скоростями (что нежелательно). Лучший эффект получается при столкновениях с атомами углерода (C_{12} – графит).

Рассмотрим прямой центральный удар шаров. Абсолютно упругий удар – такой, когда нет превращения механической энергии в другие виды энергии.

Пусть массы и скорости шаров до удара m_1 и \vec{v}_1 , m_2 и \vec{v}_2 , после удара – m_1 и \vec{u}_1 , m_2 и \vec{u}_2 (рис.1.13).

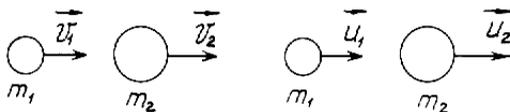


Рис. 1.13

Найдем скорости шаров после удара. Пусть шары движутся вдоль оси x . Т.к. вдоль оси x никакие силы не действуют, то систему можно считать замкнутой и применять закон сохранения энергии и импульса. При этом потенциальная энергия не меняется и ее можно не учитывать. По закону сохранения энергии имеем:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_2 u_2^2}{2} + \frac{m_1 u_1^2}{2}. \quad (1.44)$$

При прямом центральном ударе векторы скоростей направлены вдоль одной прямой (ось x), поэтому можно оперировать численными значениями скоростей. По закону сохранения импульса имеем:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2. \quad (1.45)$$

Преобразуем уравнения (1) и (2):

$$m_1 (v_1^2 - u_1^2) = -m_2 (v_2^2 - u_2^2), \quad (1.46)$$

$$m_1 (v_1 - u_1) = -m_2 (v_2 - u_2). \quad (1.47)$$

Разделим почленно (3) на (4), учитывая, что:

$(v_1^2 - u_1^2) = (v_1 - u_1)(v_1 + u_1)$; $(v_2^2 - u_2^2) = (v_2 - u_2)(v_2 + u_2)$,
получим

$$v_1 + u_1 = v_2 + u_2, \text{ отсюда } u_2 = v_1 + u_1 - v_2.$$

Подставим u_2 в (2):

$$\begin{aligned} m_1 v_1 + m_2 v_2 &= m_1 u_1 + m_2 v_1 + m_2 u_1 - m_2 v_2; \\ u_1 (m_1 + m_2) &= 2m_2 v_2 + v_1 (m_1 - m_2); \\ u_1 &= \frac{2m_2 v_2 + v_1 (m_1 - m_2)}{m_1 + m_2}. \end{aligned} \quad (1.48)$$

Так как $u_1 = u_2 + v_2 - v_1$, подставим это выражение в (1.45), получим:

$$u_2 = \frac{2m_1 v_1 + v_2 (m_2 - m_1)}{m_1 + m_2}. \quad (1.49)$$

Формулы (1.48) и (1.49) позволяют видеть, что скорости шаров после удара зависят от отношения масс шаров и их скоростей до удара.

Рассмотрим частные случаи:

1) $m_1 = m_2$, тогда $u_1 = v_2$; $u_2 = v_1$, т.е. шары обменялись скоростями;

2) $m_2 \gg m_1$, $v_2 = 0$ (легкий шар ударяется в неподвижный тяжелый). Тогда из (1.48), пренебрегая m_1 , имеем $u_1 = -v_1$, $u_2 = 0$, т.е. маленький шар полетит в обратную сторону.

Абсолютно неупругий удар. Шары деформируются, часть механической энергии рассеивается. По закону сохранения импульса:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2)u; \quad u = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2};$$

где u – скорость шаров после удара.

$$\text{Кинетическая энергия системы до удара } E_1 = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2},$$

после удара $E_2 = \frac{(m_1 v_1 + m_2 v_2)^2}{2(m_1 + m_2)}$. Изменение энергии:

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_2 - E_1 = \frac{(m_1 v_1 + m_2 v_2)^2}{2(m_1 + m_2)} - \frac{m_1 v_1^2}{2} - \frac{m_2 v_2^2}{2} = \\ &= \frac{(m_1 v_1)^2 + 2m_1 m_2 v_1 v_2 + (m_2 v_2)^2 - (m_1 v_1)^2 - m_1 m_2 v_1^2 - m_1 m_2 v_2^2 - (m_2 v_2)^2}{2(m_1 + m_2)} \\ \Delta E &= -\frac{m_1 m_2 (v_1 - v_2)^2}{2(m_1 + m_2)} < 0, \end{aligned}$$

т.е. энергия рассеялась, но это не противоречит закону сохранения энергии. Шары деформировались. На деформацию их затрачена работа A , которая точно равна убыли кинетической энергии:

$$A = \frac{m_1 m_2 (v_1 - v_2)^2}{2(m_1 + m_2)}.$$

Если второе тело неподвижно ($v_2 = 0$), то:

$$A = \frac{m_1 m_2 v_1^2}{2(m_1 + m_2)} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot E_1. \quad (1.50)$$

Неупругий удар применяется для двух целей:

1) ковка, штамповка. Здесь важно, чтобы большая часть E_1 затрачивалась на работу деформации. Из формулы (1.50) видно, что это будет тогда, когда $m_2 \gg m_1$. Поэтому при ковке масса молота (m_1) выбирается много меньше, чем масса наковальни (m_2);

2) забивание свай, гвоздей. Здесь выгодно, чтобы работа, затрачиваемая на деформацию, была наименьшей. А это будет тогда, когда $m_1 \gg m_2$, т.е. когда масса молотка (m_1) много больше массы гвоздя (m_2).

Пример 7. Применение законов механики к движению жидкостей и газов (уравнение гидро- и аэродинамики Бернулли). Движение жидкостей и газов описывается уравнением Бернулли. Получим уравнение Бернулли, опираясь на законы механики. Будем рассматривать движение идеальной жидкости – несжимаемой и невязкой, т.е. силы внутреннего трения отсутствуют. Пусть жидкость течет по наклонной сужающейся трубе. Выделим два произвольных сечения ΔS_1 и ΔS_2 , скорости жидкости в них соответственно v_1 и v_2 . Слева от ΔS_1 жидкость испытывает давление P_1 , в сечении ΔS_2 жидкость движется, испытывая противодействие P_2 жидкости, находящейся справа от сечения ΔS_2 (рис. 1.14). Если течет жидкость массы Δm , то совершается работа, т.к. на эту массу действует сила, обусловленная наличием давления P .

E_1 – полная энергия жидкости в сечении ΔS_1 ;

E_2 – в сечении ΔS_2 .

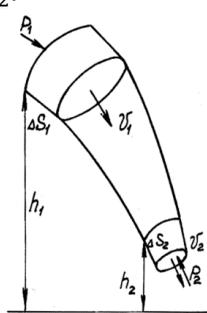


Рис. 1.14

По закону сохранения энергии изменение энергии равно работе внешних сил, перемещающих массу Δm из ΔS_1 в ΔS_2 :

$$E_2 - E_1 = A \quad (1.51)$$

$$E_1 = \frac{\Delta m v_1^2}{2} - \Delta m g h_1; E_2 = \frac{\Delta m v_2^2}{2} - \Delta m g h_2;$$

$$A = f \cdot \Delta l = P \Delta S \cdot \Delta l = P \Delta V; A = P_1 \Delta V - P_2 \Delta V. \quad (1.52)$$

Изменение объема ΔV в сечениях ΔS_1 и ΔS_2 одинаково, т.к. жидкость несжимаема (по условию). Из (1) и (2) имеем:

$$\frac{\Delta m v_2^2}{2} + \Delta m g h_2 - \frac{\Delta m v_1^2}{2} + \Delta m g h_1 = P_1 \Delta V - P_2 \Delta V.$$

Перенесем члены со знаком « \leftarrow » в одну часть равенства, разделим уравнение на ΔV и учтем, что $\Delta m / \Delta V = \rho$ (плотность), получим:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 + P_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 + P_2. \quad (1.53)$$

Это и есть уравнение Бернулли (1738). Каждый член в уравнении (1.53) имеет размерность давления.

$\frac{\rho v_1^2}{2}$ – гидродинамическое давление, обусловленное скоростью движения жидкости;

$\rho g h$ – гидростатическое давление, давление столба жидкости высотой h ;

P – статическое давление (давление в покоящейся жидкости).

Поскольку при выводе уравнения (1.53) мы выбрали сечения произвольно, то можно сказать, что сумма гидродинамического, гидростатического и статического давления в любом сечении трубы есть величина постоянная (закон Бернулли).

Применим уравнение Бернулли для определения скорости истечения жидкости из отверстия малого сечения (рис. 1.15).

Рассмотрим два сечения потока жидкости S_1 (сосуд) и S_2 (отверстие). Уравнение Бернулли для них запишется:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 + P_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 + P_2. \quad (1.54)$$

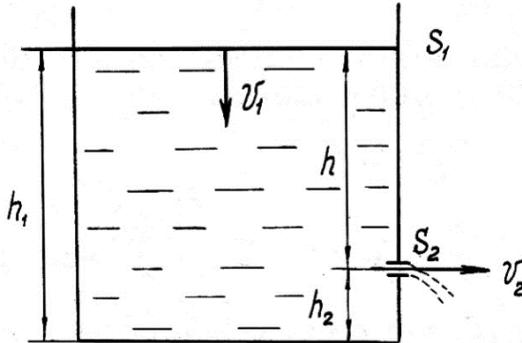


Рис. 1.15

Учитывая, что $S_1 \gg S_2$, скорость понижения уровня в со-
суде будет мала и ею можно пренебречь ($v_1 \approx 0$).

$P_1 = P_2$ – это атмосферное давление.

Тогда из (4) получим:

$$v_2 = \sqrt{2gh}, \quad (1.55)$$

где $h = h_1 - h_2$.

Формула (5) называется формулой Торичелли. Интересно,
что такую же скорость получает свободно падающее тело с вы-
соты h .

ВЫВОДЫ. В классической механике сложилась механиче-
ская схема описания движения. Зная положение материальной
точки в системе отсчета и скорости ее движения в определенные
моменты времени, можно определить параметры ее движения на
все последующие и предыдущие промежутки времени.

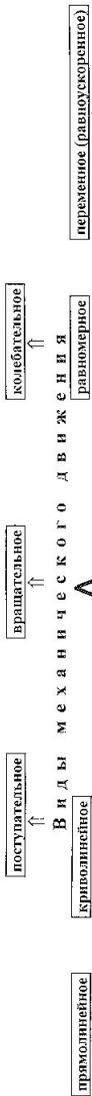
ОБОБЩЕНИЯ И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ В ТАБЛИЦАХ, РИСУНКАХ

Таблица 5

КЛАССИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

Основание		
Факты	Идеализированный объект	Понятия, физические величины
1. Кинематические закономерности движения тел (материальных точек, планет Солнечной системы) 2. Законы Кеплера	Материальная точка	1. Система отсчета 2. Пространство и время, перемещение, координата, скорость, ускорение 3. Взаимодействие 4. Сила 5. Масса 6. Импульс силы 7. Импульс тела 8. Энергия 9. Работа
Ядро		
Принципы	Законы	Математические уравнения
1. Инерции 2. Дальнодействия 3. Суперпозиции 4. Причинности 5. Относительности	1. Существуют такие системы отсчета, в которых тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока действие сил не заставит его изменить это состояние. 2. Ускорение, приобретаемое телом в инерциальной системе отсчета, прямо пропорционально векторной сумме сил и обратно пропорционально массе системы тел.	$\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m}$ $\vec{F}\Delta t = \Delta m\vec{v}$

Ядро		
Принципы	Законы	Математические уравнения
	3. Действию всегда есть равное и противоположное противодействие	$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$
Следствие		
Объяснение явлений, фактов, закономерностей	Применение законов динамики	
<p>1. Механическая схема описания движения: зная положение материальной точки в системе отсчета и скорости движения в определенный момент времени, можно определить эти параметры движения на все последующие и предыдущие моменты времени.</p> <p>2. Свободное падение тел в газах, жидкостях. Научное толкование статики, гидро- и аэродинамики</p>	<p>1. Движение тел переменной массы.</p> <p>2. Вывод и анализ законов сохранения импульса, энергии, сложения скоростей.</p> <p>3. Определение средней плотности тел, планет.</p> <p>4. Движение тел под действием одной или нескольких сил.</p> <p>5. Соударение тел и частиц (упругий и неупругий удар).</p> <p>6. Движение жидкостей и газов (уравнение Бернулли)</p>	



По виду траектории ↑
По характеру изменения скорости ↑

Классификация механического движения: положение материальной точки относительно других тел (тел отсчета) в пространстве и во времени

МЕХАНИКА (КИНЕМАТИКА)

Основная задача кинематики
(обратная задача кинематики решается путем дифференцирования)

Задан закон движения – найти скорость и ускорение, например, для колебательного движения:

$$x = X_0 \cos(\omega t + \varphi) ; v = x' = -X_0 \omega \sin(\omega t + \varphi) ; a = v' = -X_0 \omega^2 \cos(\omega t + \varphi).$$

Основная задача кинематики
(прямая задача кинематики решается путем интегрирования)

Заданы x_0 , v и a – найти кинематические уравнения движения (закон движения), например:

$$\left\{ \begin{aligned} v_x &= \frac{dx}{dt} \left\{ \int dx = \int v_x dt \right. & \left\{ \begin{aligned} x &= x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2} \\ v_x &= \int_0^t a_x dt \end{aligned} \right. \\ a_x &= \frac{dv_x}{dt} \left\{ \int dv_x = \int a_x dt \right. & \left\{ \begin{aligned} v_x &= v_{0x} + a_x t, \quad a_x = \text{const} \end{aligned} \right. \end{aligned} \right.$$

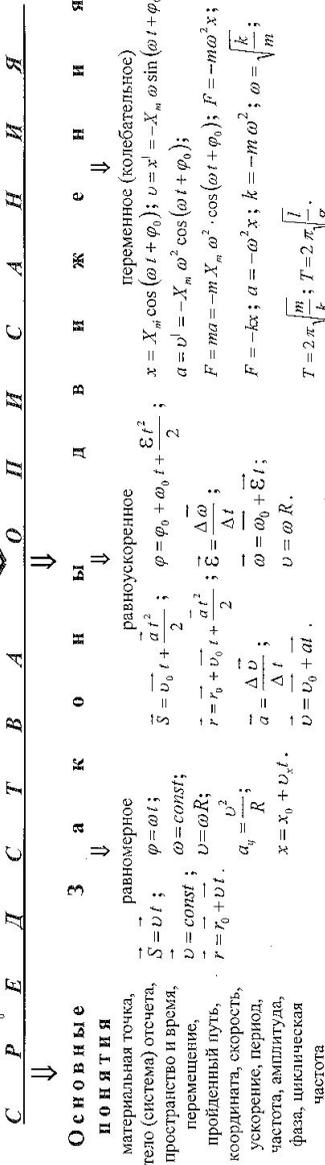
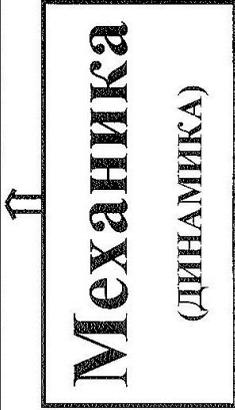


Рис. 1.16. Обобщающая схема по механике раздела «Кинематика»

П Р И Ч И Н У И З М Е Н Е Н И Я С К О Р О С Т И (у с к о р е н и я)

И з у ч а е т м е х а н и ч е с к о е д в и ж е н и е :



Основная задача динамики (обратная)

Установление закономерностей взаимодействия :
определение сил:

1. тяготения: $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$
2. упругости: $F_x = -kx$
3. трения: $F_{тр} = \mu N$

Основная задача динамики (прямая)

Определение механического состояния тела в зависимости от типа (вида) взаимодействия:

1. гравитационное
2. электромагнитное

С Р Е Д С Т В А О П И С А Н И Я

Основные понятия
механическое состояние,
инерциальная система отсчета, масса, сила, импульс силы, импульс тела, константы взаимодействия

З а к о н ы Д и н а м и к и
динамика прямолинейного движения:
Законы Ньютона:
Постулат о существовании инерциальной системы отсчета, в которой тело движется равномерно и прямолинейно

$$\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m}$$



динамика криволинейного движения:
II закон: $\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m}$; $a_y = \frac{v^2}{R}$;

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_y ; \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} ; a_n = \omega^2 R,$$

$$\text{III закон: } \vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}.$$



динамика колебательного движения:
 $F = -ma = -m\ddot{x} = -m\omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0)$;
 $a_m = -\ddot{x}_m \omega^2$; $a = -x\omega^2$;
 $x = x_m \cos(\omega t + \varphi_0)$.

Рис. 1.17. Обобщающая схема по механике раздела «Динамика»

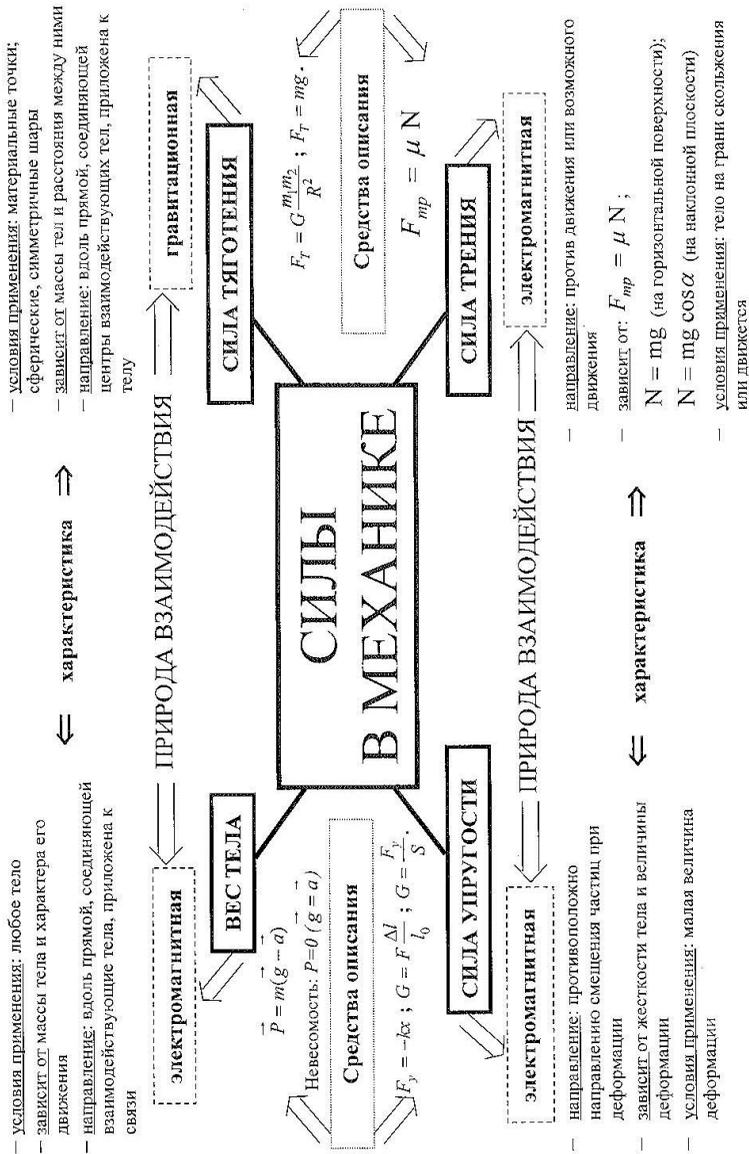


Рис. 1.19. Классификационная схема сил в механике

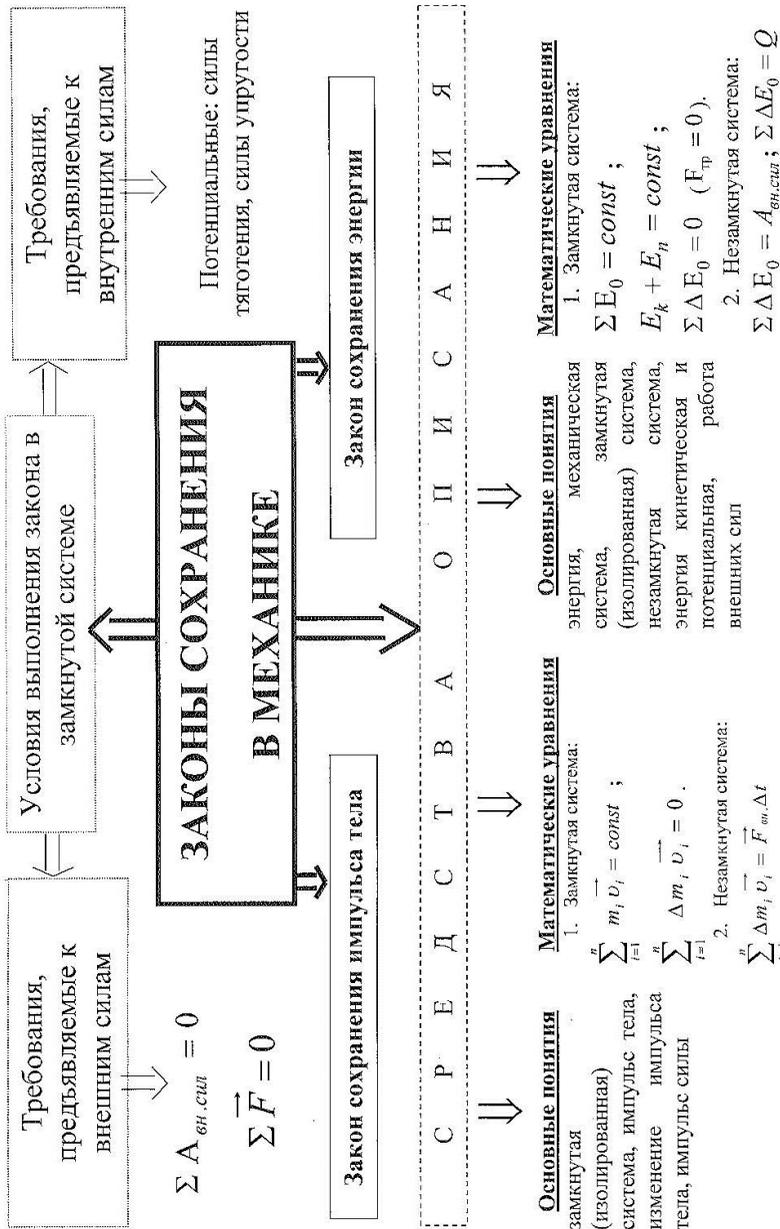


Рис. 1.20. Обобщающая схема по законам сохранения в механике

Таблица 6

**Классификация исторических опытов,
составляющих базис классической механики**

Теоретическое основание	Экспериментальный факт
ОСНОВАНИЕ	
Противоречие во взглядах на закономерности движения тел – Аристотель (IV век до н.э.) и Леонардо да Винчи (XV век). Противоречие во взглядах на устройство Вселенной – Аристотель (IV век до н.э.) и Н. Коперник (1543). Изучение природы гравитационного взаимодействия	Г. Галилей – исследование и формулировка основных кинематических закономерностей движения тел (1638) Г. Кавендиш – экспериментальная проверка закона всемирного тяготения (1665–1666)
ЯДРО	
Принцип относительности Галилея Законы Ньютона (1687) Первый закон Второй закон Третий закон	П. Гассенди – экспериментальное доказательство принципа относительности Галилея (1641) Г. Галилей – мысленный опыт (1638) Э. Мариотт – исследование столкновения упругих тел (1669); опыты повторно проведены самим И. Ньютоном (1687) И. Ньютон – опыт с плавающим куском железа и магнитом (1687)
СЛЕДСТВИЕ	
Накопившиеся экспериментальные факты, которые объяснялись взглядами античных учёных-философов и нашли единообразное объяснение в законах Ньютона	Архимед – исследования условий равновесия рычага, закономерностей действия выталкивающей силы (III в. до н.э.) Ж. Буридан, Н. Орем, А. Саксонский – исследования закономерностей движения тел (XIV в.)

Теоретическое основание	Экспериментальный факт
СЛЕДСТВИЕ	
	<p>Г. Гук – установление закона деформации (1660)</p> <p>Г. Гюйгенс – установление закона сохранения импульса (1669)</p> <p>Г. Гюйгенс – измерение ускорения свободного падения (1678)</p>
<p>Опыты, иллюстрирующие частные явления и закономерности, объясняемые законами Ньютона, а также получившие широкое применение в технике</p>	<p>Г. Кориолис – открытие дополнительного ускорения, возникающего при сложном движении (1829)</p> <p>Л. Фуко – открытие суточного вращения Земли (1851)</p> <p>Ю. Майер, Р. Джоуль – открытие закона сохранения энергии и определение механического эквивалента теплоты (1842–1843)</p>
<i>Опыты по открытию явлений и закономерностей, предсказанных на основе законов классической механики</i>	
<p>Ж. Лавуазье – существование Нептуна и Плутона (1845)</p>	<p>И.Г. Галле – первые наблюдения за Нептуном и Плутоном (1846)</p>

Задачи и упражнения

1.1. Велосипедист ехал из одного города в другой. Половину пути он проехал со скоростью 12 км/ч. Половину оставшегося времени он ехал со скоростью 6 км/ч, а затем до конца пути он шел пешком со скоростью 4 км/ч. Определите среднюю скорость велосипедиста на всем пути.

1.2. Свободно падающее тело в последнюю секунду падения прошло $\frac{2}{3}$ своего пути. Найти путь, пройденный телом.

1.3. С вышки высотой 20 км из пистолета под углом 30° к горизонту произведен выстрел. Определить скорость вылета, высоту подъема и дальность полета пули, если при падении последние 20 м пути она прошла за 0,5 с. Сопротивлением воздуха пренебречь.

1.4. Веревка длиной $l = 12$ м и силой тяжести 60 Н переброшена через блок и скользит по нему без трения. Чему равно натяжение в середине веревки в тот момент, когда длина веревки по одну сторону блока равна $l_1 = 8$ м?

1.5. Гимнаст массой 50 кг, держа в руках груз 5 кг, прыгает под углом 60° к горизонту со скоростью 6 м/с. Достигнув максимальной высоты, он бросает груз горизонтально в обратном направлении со скоростью 2 м/с относительно Земли. Определить длину прыжка.

1.6. От удара копра силой тяжести $5 \cdot 10^3$ Н, свободно падающего с некоторой высоты, свая углубляется в землю на 1 см. Определить силу сопротивления почвы, считая ее постоянной, если скорость копра перед ударом 10 м/с. Силу тяжести сваи при расчетах не учитываем.

1.7. Дерево проводит звук лучше, чем воздух. Почему же разговор, происходящий в соседней комнате, заглушается при закрытых дверях и окнах?

1.8. Шофер автомобиля, движущегося со скоростью v , внезапно увидел перед собой на расстоянии широкую стену. Что ему выгоднее: затормозить или свернуть в сторону?

1.9. Во время маневров на станции паровоз сообщил вагону массой 400 кг скорость 5 м/с. Вагон, пройдя некоторое расстояние, ударился о буфера заторможенного вагона. Пружины каждого сжались на 10 см. Какое расстояние проходит вагон от момента сообщения ему скорости до столкновения с неподвижным вагоном, если известно, что пружины сжимаются на 1 см на каждые 49 000 Н, а коэффициент сопротивления при движении вагона по рельсам составляет 0,01?

1.10. Шоссе имеет вираж с уклоном в 10° при радиусе закругления дороги 100 м. На какую скорость рассчитан вираж?

ЧАСТЬ II. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

Развитие молекулярно-кинетической теории строения вещества. Молекулярно-кинетическая теория (МКТ) развивалась в рамках механической картины мира. Основные законы механики переносились в МКТ на атомы и молекулы. Макроскопические свойства молекулярных систем пытались описывать законами динамики. Вместе с тем, для объяснения тепловых и механических свойств тел ученые используют новые методы исследования (статистические), которые были чужды механике Ньютона.

Учение о движении молекул, атомов и явлениях, обусловленных этим движением, получило название молекулярно-кинетической теории. Теория строения вещества из мельчайших частиц была развита русским ученым М.В. Ломоносовым. Согласно этой атомистической теории, все тела состоят из частиц (молекул и атомов), которые находятся в непрерывном хаотическом движении. В начале XVIII века, связав теплоту с движением частиц, исследователи отказываются от гипотезы невесомого вещества (теплорода). Многие физические и химические явления анализируются на основе атомистических представлений.

Во второй половине XVIII века возникло сложное положение в физике. Вновь возрождается теория теплорода, которая вытесняет атомистическое учение о строении вещества. Лишь в начале XIX века благодаря трудам английского химика Д. Дальтона (1766–1844) учение об атомах и молекулах вновь продолжает развиваться. Он формулирует закон парциальных давлений (1801), разрабатывает теорию атомного строения вещества, на ее основе объясняет различные химические процессы. Д. Дальтон составляет таблицу атомных весов различных химических элементов (атомный вес водорода принимает за единицу). Его таблица была несовершенна, однако открытия в области химии стимулировали развитие вновь возрождавшегося учения об атомах.

Исследования по определению атомных весов и химических формул веществ продолжил итальянский ученый А. Авогадро (1776–1856). Он высказывает предположение, выдвинутое некогда М.В. Ломоносовым. Все вещества состоят из двух типов частиц – атомов и молекул. Авогадро экспериментально доказывает, что в равных объемах различных газов при одинаковых условиях содержится одинаковое количество молекул (закон Авогадро). Шведский химик И.Я. Берцелиус, исследуя справедливость закона кратных отношений, вычисляет атомные веса многих элементов, им введены обозначения элементов – химическая символика, которая почти без изменений используется в настоящее время.

Основы молекулярно-кинетической теории газов закладывают английские физики Ватерстон (1845) и Джоуль (1851); немецкие ученые Крениг (1856) и Клаузиус (1857–1859). Они рассматривают теплоту как движение атомов и молекул, описывая характер движения частиц в твердых, жидких и газообразных веществах. В твердых телах, по их мнению, частицы совершают движение вокруг некоторых состояний равновесия (колеблются), в жидкостях молекулы движутся колебательно и поступательно, не выходя за сферу взаимного влияния, оставаясь в пределах выделенного объема. В газах частицы движутся поступательно и вращательно. Значительные расстояния между частицами газа уменьшают силы взаимодействия между ними настолько, что ими можно пренебречь. Эти представления о характере движения и взаимодействия частиц позволили создать модель идеального газа. Особенно велика роль Р. Клаузиуса (1822–1888) в разработке кинетической теории газов. Он ввел статистические представления: метод средних величин, понятие длины свободного пробега молекул. Ему удалось вычислить эту величину, а также величину давления газа на стенки сосуда. Клаузиус ввел понятие о сфере молекулярного действия; уравнению газового состояния

придал более общую форму; сумел обосновать уравнение Клапейрона.

Новым важным шагом в развитии кинетической теории газов явилась работа Д.К. Максвелла (1859). Он установил статистический закон, описывающий распределение молекул газа по скоростям, развил теорию явлений переноса, применив ее к анализу процесса диффузии, теплопроводности.

Основные работы в области кинетической теории газов были выполнены австрийским физиком-теоретиком Л. Больцманом (1844–1906). Он установил закон распределения газовых молекул по скоростям и координатам во внешнем силовом поле (статистика Максвелла–Больцмана); на основе статистического метода вывел основное кинетическое уравнение для идеального газа (1872).

Экспериментальные и теоретические исследования в области молекулярной теории позволили выделить несколько положений, которые и составляют эмпирический базис теории.

Положения молекулярно-кинетической теории строения вещества, их опытные обоснования. Суть молекулярно-кинетической теории строения вещества определена уже в самом названии. Термин «молекулярно-кинетическая теория» означает: все вещества состоят из молекул, которые движутся. Это и есть основная идея теории. Основание теории составляют три основных положения и их опытное обоснование.

1. Все вещества дискретны. Они состоят из мельчайших частиц (атомов и молекул), между которыми существует свободное пространство.

Дискретность вещества подтверждают такие явления, как испарение, кипение, конденсация, сублимация, химизм реакций. Под действием внешних сил или при изменении температуры объем тел не остается постоянным, потому что меняется расстояние между частицами. Этот факт можно объяснить только

дискретным строением вещества. Процесс диффузии (взаимное проникновение веществ, приведенных в непосредственный контакт) подтверждает дискретность вещества, а также наличие свободного пространства между молекулами. Приведем опытные факты, свидетельствующие о том, что между молекулами существует свободное пространство. Вещество, находящееся в трех агрегатных состояниях, имеет различный молярный объем (объем одного моля). Например, объем одного моля воды меньше, чем объем одного моля льда (поэтому лед плавает), а объем одного моля водяных паров может быть любым (газ занимает весь предоставленный объем). Плотность упаковки молекул вещества в различных агрегатных состояниях различна.

Изменением объема свободного пространства объясняется и изменение объема тел при нагревании. Интересный опыт, позволивший непосредственно выделить и наблюдать свободное пространство, был поставлен Д.И. Менделеевым. Длинную (около 1 м) стеклянную трубку, закрытую пробкой, наполнили до половины водой, а выше – спиртом, так что жидкость занимала весь объем трубки. После перемешивания (трубку переверачивают) вверху появляется «пузырек воздуха». Воздух внутри трубки проникнуть не мог, стало быть, выделилось в чистом виде «свободное пространство». Более мелкие молекулы воды заняли свободные места между более крупными молекулами спирта, получилась более плотная упаковка молекул смеси и поэтому теперь они заняли меньший объем.

Наконец, современная техника (электронный микроскоп) позволяет увидеть крупные молекулы некоторых органических веществ. В обычном микроскопе различаются только предметы, размеры которых сравнимы с длиной волны света. Для середины спектра (желтый свет) это примерно 550 Нм. Размеры же молекул составляют десятые доли нанометра (10^{-10} м), поэтому в электронном микроскопе, где длина волны пучка электронов имеет значение 10^{-2} и 10^{-10} м, можно различать отдельные молекулы.

Каковы размеры молекул? Диаметры молекул – это средние расстояния, на которые они могут сблизиться при соударениях. Рассчитаем размеры молекул воды, при этом сделаем предположение, что частицы так близко расположены друг с другом, что промежутками между ними можно пренебречь. Если элементарные объемы являются кубиками, в каждом из которых содержится по одной молекуле, то среднее расстояние между частицами (диаметр молекулы) составляет:

$$l = d = \left(\frac{V}{N}\right)^{1/3},$$

где V – объем системы; N – число частиц в ней, $\frac{V}{N}$ – объем, приходящийся на одну частицу. Если молярная масса воды 18 г/моль; а плотность воды 1 г/см³, то молярный объем равен 18 см³/моль. В одном моле вещества, как показал Авогадро, содержится $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ молекул, тогда:

$$d = \left(\frac{18}{6 \cdot 10^{23}}\right)^{1/3} \approx 3 \cdot 10^{-8} \text{ см.} \quad (2.1)$$

Размер молекул (исключая полимеры) имеет порядок 10⁻⁸ см.

При переходе вещества из жидкого состояния в газообразное размеры молекул сохраняются.

В жидкостях среднее расстояние между молекулами примерно равно размерам частицы. Рассчитаем это расстояние между молекулами в газах. При нормальных условиях ($p = 10^5$ Па; $T = 273$ К) моль газа занимает объем $22,4 \cdot 10^{-3}$ м³, тогда $\bar{r} = \left(\frac{22400}{6 \cdot 10^{23}}\right)^{1/3} \approx 3,3 \cdot 10^{-7}$ см. Расчеты показывают, что среднее расстояние между молекулами газообразного вещества значительно превышает размеры молекулы.

2. Частицы вещества (молекулы, атомы) находятся в непрерывном хаотическом движении. Факт непрерывного хаотического движения частиц подтверждается броуновским движением. Это движение взвешенных частиц вещества в жидкостях и

газах. Шотландский ботаник Р. Броун (1827) обнаружил беспорядочный характер движения пыльцы растений в жидкости, причем интенсивность броуновского движения, как показали исследования, возрастает с увеличением температуры. Окружающая среда (ее химический состав) не оказывает влияния на броуновское движение. Объяснить характер его смогли лишь в конце XIX века в связи с развитием молекулярно-кинетической теории. Качественное объяснение процессу дал Дельсо (1877). Движение броуновской частицы обусловлено различием в силе удара молекул жидкости, подлетающих к частице с разных сторон. Автором количественной теории броуновского движения стали Эйнштейн (1905) и М. Смолуховский (1905–1906). Экспериментальное подтверждение дает Перрен.

Если броуновская частица движется благодаря ударам молекул среды, то можно предположить, что к скорости броуновской частицы, как и к скорости молекулы, можно применить распределение Максвелла–Больцмана:

$$\frac{mv_6^2}{2} = \frac{3}{2}kT, \text{ тогда } v_6^2 = \frac{3kT}{m_6}, \quad (2.2)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – постоянная Больцмана, v – скорость, v – объем.

Средняя квадратичная скорость молекулы вычисляется по формуле

$$v_M^2 = \frac{3kT}{m_M}. \quad (2.3)$$

Разделив первое равенство на второе, получим

$$\frac{v_6}{v_M} = \sqrt{\frac{m_M}{m_6}}. \quad (2.4)$$

Последнее соотношение позволяет сравнивать скорости броуновской частицы и молекул среды. Наблюдения свидетельствуют о том, что характер движения броуновских частиц полностью соответствует характеру движения молекул. Разница состоит только в скорости движения: скорости молекул составляют

сотни метров в секунду, скорости броуновских частиц – несколько миллиметров в секунду. Это различие определяется разницей масс частиц и молекул (2.4).

Подробное изучение скорости теплового движения молекул – задача непростая. Вследствие хаотического движения и частых столкновений скорости частицы с течением времени меняются по величине и направлению. Остаются постоянными в равновесных состояниях лишь средние скорости теплового движения молекул $v = \frac{\sum_{i=1}^N v_i}{N}$, где N – число молекул, v_i – скорость i -молекулы. Кроме средних скоростей движения молекул, вводят понятие «средняя квадратичная скорость», квадрат которой определяется выражением

$$\overline{v^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2. \quad (2.5)$$

Через среднюю квадратичную скорость теплового движения молекул выражается суммарная кинетическая энергия поступательного движения частиц. Задача отыскания средних значений величин упрощается и становится вполне решаемой на основании статистических закономерностей.

Проблему распределения молекул газа по скоростям в состоянии теплового равновесия удалось решить Д.К. Максвеллу (1867). Он получил формулу для Δn числа молекул, имеющих скорости в интервале от v до $(v + \Delta v)$:

$$\Delta n = C N e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \cdot v^2 \Delta v, \quad (2.6)$$

где N – общее число молекул системы; C – некоторая постоянная; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; m – масса молекулы.

График функции (2.6) в осях v и $\frac{\Delta n}{\Delta v}$ (число молекул в единичном интервале значений скоростей) представлен на рис. 2.1. Из графика видно, что в любом заданном объеме наибольшее число молекул обладает скоростями, близкими к скорости v_B .

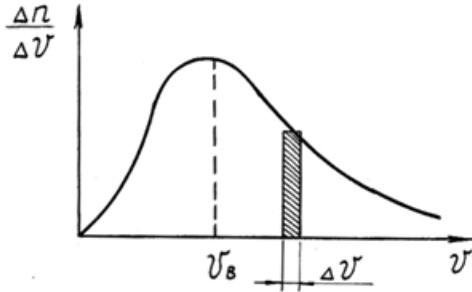


Рис. 2. 1

Эту скорость назвали наиболее вероятной скоростью движения частиц. Вычислив ее по формуле (2.6), получили

$$v_B = \sqrt{\frac{2kT}{m}}. \quad (2.7)$$

Эта скорость немного выше средней квадратичной скорости

$$\sqrt{v^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}. \quad (2.8)$$

Выражения (2.7) и (2.8) свидетельствуют о том, что v_B и v^2 зависят от температуры. Заметим, что распределение молекул по скоростям (2.6) так же, как и распределение их в пространстве по направлениям движения, по высоте в гравитационном поле, выполняются для систем, состоящих из большого числа частиц.

Максвелловский закон распределения молекул по скоростям экспериментально подтвержден Дж. Элдриджем (1927). О. Штерном (1920) осуществлен опыт по определению скорости атомов серебра на установке, состоящей из двух коаксиальных цилиндров. По оси этих цилиндров через платиновую проволоку, покрытую тонким слоем серебра, пропускали электрический ток (рис. 2.2). Внутренний цилиндр имел щель, его радиус – r ; радиус большого цилиндра – R . В приборе создавался вакуум, давление составляло $\sim 10^{-7}$ Па. Электрический ток, проходя через проводник, нагревал его. С поверхности нити испарялось серебро.

Пройдя щель внутреннего цилиндра (2.2 б), атомы серебра оседали на внутренней поверхности внешнего цилиндра, создавая слой серебра в виде тонкой, одинаковой по толщине полоски (на рис. 2.2 – точка А). Когда внешний цилиндр приводился во вращение, то атомы серебра осаждались в другом месте (рис. 2.2 – точка В) на расстоянии ΔS от точки А. Это смещение можно найти по формуле $\Delta S = \omega(R - r)\Delta t$, где $\Delta t = \frac{R-r}{v}$, тогда, $\Delta S = \omega(R - r) \cdot \frac{R-r}{v}$,

$$v = \frac{(R-r)^2 \cdot \omega}{\Delta S}. \quad (2.9)$$

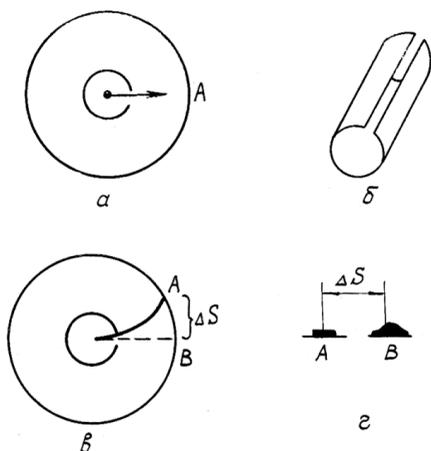


Рис. 2.2

Измерив расстояние между полосками серебра и угловую скорость вращения цилиндра, можно оценить скорость атомов серебра. Эксперимент показал, что полоска в т. В оказалась размытой. Это объясняется тем, что атомы, вылетавшие из щели внутреннего цилиндра, имели разные скорости. Поверхности внешнего цилиндра быстрее достигают атомы, имеющие большие скорости, они будут меньше смещены. Медленные атомы достигнут поверхности цилиндра позже, поэтому полоска в т. В

будет размытой. Середина этой полоски имеет наибольшую толщину. Это значит, что наибольшее число частиц приходится на некоторые скорости, которые названы в распределении Максвелла наиболее вероятными. Используя распределение Максвелла, рассчитали эту скорость в опыте Штерна, она оказалась равной

$$v_B = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}, \quad (2.10)$$

где R – универсальная газовая постоянная ($R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$).

Полученный результат подтверждал расчеты Максвелла. Теоретические исследования показали, что тепловые скорости движения атомов при одинаковой температуре находятся в обратной зависимости от их масс, или молярных масс:

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}}, \quad \bar{v}_1 = \sqrt{\frac{\mu_2}{\mu_1}}. \quad (2.11)$$

Опытные расчеты подтверждают эти теоретические выводы. Например, скорость теплового движения молекул кислорода при комнатной температуре ($\mu=32$ кг/моль): $\bar{v}_1 = \sqrt{\frac{3 \cdot 8,31 \cdot 300}{0,032}} \approx 500$ (м/с). Молекула водорода ($\mu=2$ кг/моль) при тех же условиях имеет массу, в 16 раз меньшую. Ее скорость увеличивается в четыре раза: $\bar{v}_2 = \bar{v}_1 \sqrt{16} = 4\bar{v}_1$; $\left(\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{2}{32}} = \sqrt{\frac{1}{16}}\right)$.

Численное значение этой скорости 2000 м/с. Таким образом, при одинаковых условиях молекула кислорода за 1 с проходит 0,5 км, а молекула водорода за это же время – 2 км. Приведенные расчеты свидетельствуют о том, что скорости частиц немалые. Казалось, имея такую скорость теплового движения, молекулы должны очень быстро двигаться и занимать все окружающее их пространство. Жизненный опыт и эксперименты (диффузия) убеждают нас в том, что газу требуется значительное время для

распространения в каком-либо пространстве. Объяснить это кажущееся противоречие нетрудно, если вспомнить, как движутся молекулы газа. Они испытывают многократные столкновения с окружающими молекулами, при этом постоянно меняют направления своего движения, поэтому скорость направленного движения частиц (скорость дрейфа) оказывается небольшой. Только в вакууме молекулы газа, не встречая препятствий, будут двигаться с рассчитанными выше скоростями.

3. Третье положение теории утверждает: существует межмолекулярное взаимодействие. Эти силы по своей природе – электромагнитные. Взаимодействие атомов (молекул) обусловлено взаимодействием заряженных частиц: электронов, ядер атомов (ионов). Если расстояние между атомами (молекулами) соизмеримо с их размерами ($r = d = 10^{-8}$ см), то силы электрического отталкивания между одноименно заряженными частицами (положительно заряженными ядрами или отрицательно заряженными электронами) и силы притяжения между разноименно заряженными частицами (ядрами атомов и электронными оболочками) равны, их равнодействующая – ноль. Это положение частиц, соответствующее равновесному состоянию, наиболее устойчиво.

Силы взаимного притяжения и отталкивания атомов (молекул) быстро убывают с увеличением расстояния (рис. 2.3). С ростом расстояния силы отталкивания (\vec{F}_1) убывают быстрее, чем силы притяжения (\vec{F}_2). График результирующей силы (F) можно найти путем алгебраического сложения ординат графиков $F_1(r)$ и $F_2(r)$. Он имеет характерный минимум. Если расстояние между взаимодействующими частицами больше размеров молекул ($r > d$), они притягиваются, если $r < d$, частицы отталкиваются. На расстоянии $r = r^*$ сила притяжения между частицами максимальна, при дальнейшем увеличении расстояния при $r \approx (3 - 4)d$ сила взаимодействия между частицами приближается к

нулю. Расстояние, на котором начинают проявлять себя силы притяжения и отталкивания, получило название радиуса молекулярного действия. Молекулярно-кинетическая теория исходит из предположения, что молекулы идеального газа находятся на расстояниях, больших радиуса молекулярного действия, поэтому силами взаимодействия для них можно пренебречь.

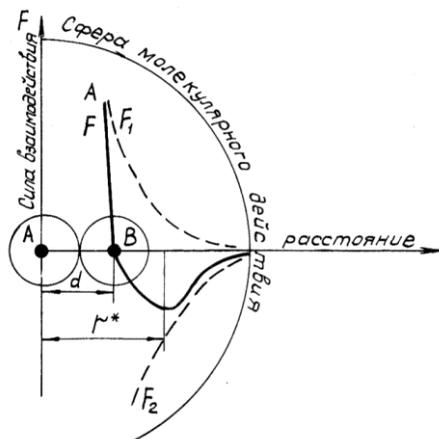


Рис. 2.3

Доказательством существования сил взаимодействия между молекулами является сам факт существования макроскопических тел: если бы были только силы притяжения, то все частицы слились бы в один ком, если бы были только силы отталкивания, то всё бы удалялось на большие расстояния. В окружающих нас конденсированных системах (жидкостях и твердых телах) молекулы располагаются на таких расстояниях, на которых силы притяжения и отталкивания уравниваются.

Сопротивление тел деформациям также свидетельствует о наличии сил взаимодействия между молекулами. Деформации растяжения противодействуют силы притяжения между молекулами, а деформации сжатия – силы отталкивания.

Почему не наблюдается притяжение двух тел, приведенных в контакт? Потому что не удастся в обычных условиях сблизить тела на расстояние, равное радиусу действия сил притяжения между молекулами. Этому мешают микронеровности поверхностей соприкосновения тел и частицы пыли, всегда присутствующие в воздухе. Если, например, тщательно отшлифовать поверхности двух кусков свинца, то они «слипнутся». Интересен такой простейший опыт, иллюстрирующий действие молекулярных сил. Две стеклянные пластинки, приведенные в контакт, легко распадаются. Если же между ними поместить несколько капель воды, то они слипаются. Здесь вода играет роль «соединительного звена»: молекулы первой пластинки взаимодействуют с молекулами воды, а они – с молекулами второй пластинки.

ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ – МОДЕЛЬ ТЕОРИИ. Идеальный газ – простейшее состояние вещества, которое может быть условно названо бесконечно разреженным состоянием. Понятием «идеальный газ» оперируют в том случае, когда имеют дело с достаточно большими молярными объемами при малых давлениях и при достаточно высоких температурах.

Реальный газ можно рассматривать как идеальный, если средняя потенциальная энергия взаимодействия частиц много меньше средней кинетической энергии их движения, если газ настолько разрежен, что силами взаимодействия между частицами и собственными размерами частиц можно пренебречь. Идеальный газ подчиняется уравнению состояния (уравнению Менделеева–Клапейрона).

Молекулы идеального газа рассматриваются как материальные точки (имеют массу покоя, не равную нулю, но не имеют объема). Все процессы, происходящие в идеальном газе, подчиняются законам сохранения массы, энергии, импульса, законам статистической физики. Идеальный газ – относительно устойчивая модель. Его устойчивость вызвана определенным типом внутренних и внешних связей и определенной формой движения.

Выделим основные свойства идеального газа:

- среднее расстояние между молекулами несравненно больше их размеров;
- молекулярные силы исчезающе малы;
- обмен энергией между молекулами идеального газа происходит только при их соударении;
- суммарная внутренняя энергия идеального газа представляет собой сумму энергий отдельных молекул;
- в промежутках между столкновениями беспорядочное тепловое движение молекулы является прямолинейным и равномерным и описывается законами И. Ньютона;
- средняя квадратичная и вероятная скорости движения молекул идеального газа определяются температурой:

$$\overline{v^2} = \frac{3kT}{m}; v_B^2 = \frac{2kT}{m}; \text{ где } m = \frac{\mu}{N_A}.$$

Реальные газы при обычных условиях проявляют свойства, присущие идеальному газу. Одним из проявлений этого является тот факт, что один моль любого газа при одинаковых условиях (давлении и температуре) занимает одинаковый объем.

Плодотворность модели идеального газа объясняется тем, что при обычных условиях (не очень высоких давлениях и не очень низких температурах) реальные газы по своим свойствам близки к идеальному, а именно: собственный объем молекул по сравнению с объемом, занимаемым газом, весьма мал и им можно пренебречь, а отсюда расстояния между молекулами значительно больше радиуса действия сил притяжения между молекулами ($\sim 10^{-9}$ м) и эти силы притяжения можно не учитывать.

При высоких давлениях молекулы сближаются настолько, что их взаимодействие становится ощутимым и собственный объем молекул газа будет сравним с объемом, им занимаемым. При этом поведение реального газа отличается от законов идеального газа, т.е. модель последнего уже не работает. То же самое

наблюдается и при низких температурах, когда тепловое движение молекул уже «не затушевывает» взаимодействие между молекулами (что характерно при обычных и высоких температурах).

Таким образом, модель идеального газа успешно описывает свойства реальных газов при невысоких давлениях и не очень низких температурах.

ПОНЯТИЯ И ПАРАМЕТРЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ СТАТИСТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ. В задачу молекулярно-кинетической теории входит: установить количественные связи между макроскопическими свойствами системы (сжимаемость, давление, температура и др.) и особенностями теплового движения частиц, входящих в эту систему. Молекулярная физика рассматривает системы, состоящие из огромного числа частиц (макросистемы). Каждая частица испытывает около миллиарда столкновений в секунду с другими, входящими в эту систему. Эти взаимодействия приводят к тому, что у молекул постоянно меняются их скорости, направления движения, траектория, поэтому предсказать их практически невозможно. Если движение одной частицы можно описать законами динамики, то поведение большого коллектива частиц подчиняется другим закономерностям – статистическим.

На первый взгляд казалось, что, описав с помощью законов Ньютона поведение одной молекулы и обобщив полученные результаты, можно рассчитать движение всех остальных частиц. Предполагалось, что между механикой и молекулярной физикой чисто количественная разница. Однако скоро стало ясно, что это не так, различия между ними принципиальные. Как уже отмечалось, массовость, огромное количество движущихся частиц порождает беспорядочный характер движения отдельной частицы. Система, состоящая из большого числа частиц, приобретает такие характеристики, которые не свойственны отдельно взятой частице. Такими характеристиками являются, например, давление, температура, теплопроводность, вязкость и др. Закономерности,

которым подчиняются огромные количества частиц, получили название **статистических**. Они проявляются в том, что:

- газ занимает весь предоставленный ему объем;
- плотность газа в результате диффузии становится постоянной;
- давление газа на тело, находящееся в нем, со всех сторон одинаково и равно некоторой постоянной величине;
- с увеличением скорости движения молекул повышается температура газа и т.д.

Метод, с помощью которого описываются эти закономерности, получил название статистического. Важнейшими понятиями этого метода являются: вероятность событий, статистическое распределение.

Вероятность событий. В практике часто приходится встречаться с событиями случайными. События, которые мы не можем предсказать однозначно, получили название случайных. Если эти события массовые, то они приобретают свои закономерности.

Рассмотрим пример. На горизонтальную поверхность бросают игральную кость с нумерованными гранями: 1, 2, 3, 4, 5, 6. Появление той или иной грани сверху в результате одного броска – событие случайное, не предсказуемое. Если произвести большое число бросаний, то частота появления одной из шести граней практически постоянна и равна $n = \frac{N}{6}$, где N – число бросаний; n – число выпаданий какой-то одной грани кубика. Частота появления тех или иных случайных событий характеризуется их вероятностью. Вероятность ожидаемого события (W) определяется пределом отношения числа появления этого события (n), к общему числу всех событий (N), при $N \rightarrow \infty$

$$W = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{n}{N} \quad (2.12)$$

В нашем примере вероятность появления той или иной грани кубика сверху равна $1/6$; рассмотренный пример позволяет сделать важный вывод. Для массовых случайных событий обнаруживается статистическая закономерность появления события с частотой, близкой к вероятности.

Средняя скорость движения. Этот метод позволил Максвеллу найти статистическое распределение молекул по скоростям. Из общего числа N молекул Δn число их имеет скорость в интервале скоростей $(v + \Delta v)$. Тогда вероятность $\frac{\Delta n}{N}$ того, что Δn число молекул будет иметь скорость в интервале $v - (v + \Delta v)$ будет зависеть от скорости теплового движения частицы и от интервала скоростей:

$$\Delta W = f(v)\Delta v; \Delta n = CNe^{-\frac{mv^2}{2kT}} \cdot v^2 \cdot \Delta v. \quad (2.13)$$

В исследованиях Максвелла наибольшее число частиц пришлось на скорость, которая получила название наиболее вероятной.

Уже отмечалось, что важнейшей характеристикой статистического распределения является среднее значение случайной величины. Среднее значение случайной величины равно сумме произведений случайных величин на вероятность ее появления. Эта величина постоянная при очень большом числе измерений и может быть определена:

$$\bar{v} = \frac{v_1 n_1 + v_2 n_2 + v_3 n_3 + \dots}{N} = v_1 \frac{n_1}{N} + v_2 \frac{n_2}{N} + \dots = \sum_{i=1}^N v_i \frac{n_i}{N}. \quad (2.14)$$

В дополнение к средним значениям величины вводят среднее значение квадрата величины. Для скорости, например:

$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 n_1 + v_2^2 n_2 + v_3^2 n_3 + \dots}{N} = \sum_{i=1}^N v_i^2 \frac{n_i}{N}. \quad (2.15)$$

Длина свободного пробега молекул – это расстояние, которое проходит молекула между двумя последовательными столкновениями. Вследствие хаотического движения частиц длина свободного пробега – величина случайная, поэтому можно говорить о средней длине свободного пробега. Ее можно найти, если

разделить скорость теплового движения частицы (расстояние, проходимое частицей за одну секунду) на число столкновений молекулы за это время:

$$\bar{\lambda} = \frac{v}{z}. \quad (2.16)$$

Подсчеты показали, что при нормальных условиях средняя длина свободного пробега молекулы составляет 10^{-6} см.

Давление газа. Двигаясь беспорядочно, частицы приближаются к стенкам сосуда, в которой они заключены. Между молекулами газа и молекулами вещества стенок сосуда происходит взаимодействие (столкновение). Согласно третьему закону Ньютона молекулы газа действуют на стенки сосуда с определенной силой, тогда стенка действует на молекулы с силой, равной и противоположно направленной. Чем больше поверхность стенок, тем больше сила, с которой частицы действуют на стенку. Давление, оказываемое молекулами газа на стенку, уже не зависит от площади поверхности стенки (в нашем опыте случайного фактора). Оно определяется формулой $p = \frac{F}{S}$. Свойство газа оказывать давление на стенки – одно из важнейших его свойств.

Внутренняя энергия – это энергия гравитационного, химического, электромагнитного, ядерного, слабого взаимодействия; кинетическая и потенциальная энергия частиц системы. В молекулярной физике внутреннюю энергию системы связывают с кинетической и потенциальной энергией частиц. В молекулярно-кинетической теории газов пренебрегают силами взаимодействия между молекулами идеального газа, поэтому внутренняя энергия определяется только кинетической энергией движущихся частиц. Кинетическая энергия частицы при определенной температуре вследствие ее поступательного движения равна $\bar{u} = \frac{mv^2}{2}$. Каждому состоянию системы соответствует лишь одно значение энергии. При переходе системы из состояния с энергией \bar{u}_1 в состояние с энергией \bar{u}_2 происходит изменение энергии $\Delta\bar{u} = \bar{u}_2 - \bar{u}_1$. Это изменение не зависит от того, какие значения

система принимала в промежуточных состояниях. Оно определяется только начальными и конечными параметрами системы. Величины, обладающие такими свойствами, получили название функций состояния. *Внутренняя энергия – функция состояния системы.* Если система замкнутая, то внутренняя энергия системы остается величиной постоянной. Изменить ее можно в процессе совершения работы и в процессе теплопередачи.

Работа. Количество теплоты. Как уже отмечалось, существует два способа изменения внутренней энергии (состояния системы). Первый способ – совершение системой (над системой) работы – связан с изменением внешних параметров системы. Например, при изобарическом процессе работа определяется давлением и изменением объема, занимаемого газом. Второй способ изменения внутренней энергии – осуществление теплообмена между системой и внешними телами. Он не связан с изменением внешних параметров системы, в этом процессе изменяется температура – внутренний параметр системы. Количество энергии, которое система передает в процессе теплообмена, получило название количества теплоты. Иными словами, количество теплоты – мера изменения внутренней энергии системы. Работа и количество теплоты – скалярные величины, но им приписывается знак. Работа и количество теплоты считаются положительными, если оба способа изменения энергии приводят к ее увеличению ($\Delta u > 0$). Если внутренняя энергия системы убывает ($\Delta u < 0$), работу совершает сама система, а количество тепла передается от системы внешним телам. В этих случаях работа и количество теплоты имеет отрицательное значение.

Температура. Состояние системы определяется не только внутренней энергией, но и температурой. Обе эти физические величины – внутренние параметры системы. Используют температуру для описания равновесного состояния системы. Это такое состояние, при котором в отсутствии внешних воздействий все параметры системы остаются неизменными. Такую систему еще называют статистической. Первые житейские представления о

температуре связаны со степенью нагретости. Если две системы находятся в равновесном состоянии, то говорят, что они имеют постоянную температуру, одинаковую нагретость тела.

В отличие от внутренней энергии, объема и других параметров системы температура не обладает свойствами аддитивности. Объем (внутренняя энергия) всей системы равен сумме объемов (внутренней энергии) ее частиц. Физические величины, подчиняющиеся закону аддитивности, можно измерять путем сравнения их с эталонами (объем сравнивают с единицей объема). Температуру, не обладающую этим свойством, нельзя измерять непосредственно. Ее определяют по изменению свойства вещества, удобного для измерения. Например, измеряя объем жидкости в различных состояниях, можно каждое ее состояние сопоставить с определенной температурой. Так, таяние льда при нормальном атмосферном давлении соответствует нулю температуры; а температура кипения воды при тех же условиях – ста градусам по шкале Цельсия. Температуру можно представить как меру отклонения состояния системы от теплового равновесия с тающим льдом при нормальном атмосферном давлении. Такую температуру нередко называют макроскопической, или эмпирической. Позже на основании МКТ рассмотрим микроскопическое определение всех физических величин, характеризующих состояние системы.

Принципы молекулярно-кинетической теории – законы классической статистики. Принципы любой теории не выводятся непосредственно из опыта, они, как правило, формулируются на основе обобщений данных эксперимента с помощью определенных теоретических идей. Исходные принципы отражают важнейшие свойства идеализированного объекта теории. На их основе, с помощью логических и математических методов раскрывается фундаментальный закон, составляющий ядро данной теории. В молекулярно-кинетической теории три принципа статистики составляют ее ядро:

1. Принцип равновесного состояния. Состояние системы определяется совокупностью параметров. Они и определяют свойства данной системы. Состояние молекулярной системы определяют: давление (P), объем (V), температура (T). Между ними существует функциональная зависимость, которая выражается уравнением состояния. **Если система, содержащая огромное количество частиц, изолирована от внешних воздействий, то через некоторое время она достигнет равновесного состояния.** Параметры этой системы не будут меняться с течением времени. Когда речь идет о равновесных системах, то рассматривается равновесие системы как целого. Тепловое движение частиц системы не только не нарушает равновесного состояния, а напротив, способствует достижению этого состояния.

Молекулярно-кинетическая теория исключает из рассмотрения такие системы, которые могут самопроизвольно выйти из равновесного состояния, или такие, которые не приходят в равновесное состояние. Системы, состоящие из небольшого числа частиц, могут самопроизвольно выйти из состояния равновесия. К бесконечным системам вселенной тоже неприменим первый принцип статистики.

2. Принцип молекулярного хаоса. В равновесном состоянии частицы двигаются хаотически, т.е. любые направления движения частиц равновероятны. Если частица движется по прямой и ее положение определяется одной координатой (x), то говорят, что частица имеет одну степень свободы. Число степеней свободы – это число независимых координат, определяющих положение частицы в пространстве. Если она движется на плоскости, ее положение определяется двумя координатами (x, y). В этом случае говорят, что молекула имеет две **степени свободы**. Если положение частицы определяется тремя координатами (x, y, z), то она имеет три степени свободы. В системе с огромным числом частиц движение их беспорядочно. Но в любом заданном

объеме все три направления движения частицы (x, y, z) равновероятны, поэтому можно предположить, что одна третья от общего числа частиц движется вдоль оси x , еще одна треть вдоль оси y , такое же число частиц движется вдоль оси z . В среднем на каждую степень свободы одноатомной молекулы приходится одинаковое число частиц. Движущиеся частицы двухатомной и трехатомной молекулы имеют шесть степеней свободы. Три степени свободы поступательного движения и три угла поворота. θ и Ψ – это углы, образованные положением оси, проходящей через центр тяжести частицы к двум из трех координатных осей. Вращательное движение частицы вокруг этой оси задается углом поворота φ . Таким образом, учитывая поступательное, вращательное и колебательное движения частицы, можно сказать, что она обладает шестью степенями свободы.

3. Равномерное распределение энергии по степеням свободы. Все направления движения частицы равновероятны. Это утверждение относится не только к поступательному движению частиц, но и к вращательному и колебательному тоже, т.е. нет оснований считать, что какое-то из направлений движения частицы предпочтительнее. Тогда можно утверждать, что в среднем на каждую степень свободы частицы приходится одинаковая внутренняя энергия. Исследования Больцмана и Максвелла позволили заключить, что на одну степень свободы приходится энергия, равная $1/2$ кТ. Если число степеней свободы i , тогда полная энергия равна $i/2$ кТ. Полная кинетическая энергия одного моля газа, а в нем содержится число частиц, равное числу Авогадро, составляет:

$$\bar{E} = \frac{i}{2} \text{кТ} \cdot N_A \text{ или } \bar{E}_\mu = \frac{i}{2} \text{RT},$$

для любой массы газа –

$$\bar{E} = \frac{M}{\mu} \cdot \frac{i}{2} \text{RT}. \quad (2.17)$$

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории строения вещества. Как уже отмечалось, между параметрами, характеризующими систему, существует функциональная зависимость. Для простейшей системы: $p = f(v, t)$. Установим вид этой зависимости. Для этого рассмотрим, как можно вычислить давление, обусловленное ударами отдельных молекул.

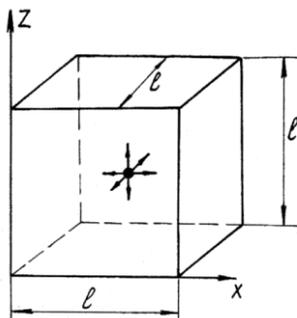


Рис. 2.4

Для простоты расчета объема, занимаемого идеальным газом, рассмотрим сосуд, занимаемый газом в форме куба, длина ребра которого l (рис. 2.4). Площадь грани куба $- l^2$; объем, занимаемый газом, $- l^3$. В заданном объеме $- N$ молекул, которые движутся хаотически. Все направления движения частиц (x, y, z) равновероятны, поэтому $1/3$ всех молекул движется вдоль оси x , ударяясь в левую и правую грани куба; $1/3$ движется вдоль оси y , ударяясь в верхнюю и нижнюю грани; еще $1/3$ молекул движется вдоль оси z , ударяясь в переднюю и дальнюю грани куба. В каждом из указанных направлений движется n число молекул ($n = \frac{1}{3} N$).

Применив законы Ньютона, выразим импульс силы от удара одной молекулы о грань куба. Импульс молекулы до удара (mv), после абсолютно упругого удара он становится равным ($-mv$), т.е. частица после соударения движется с такой же по

величине скоростью, но в противоположном направлении. Изменение импульса молекулы после удара $-mv - (mv) = -2mv$. На основании второго закона Ньютона импульс силы, действующей на молекулу, равен $f\Delta t = -2mv$. Согласно третьему закону Ньютона стенка получает такой же импульс, но с обратным знаком $f\Delta t = 2mv$. От удара до следующего удара о ту же грань молекула проходит расстояние $2l$. За одну секунду она ударяется о стенку $\frac{v}{2l}$ раз. Умножим левую и правую части равенства $f\Delta t = 2mv$ на $\frac{v}{2l}$, получим

$$f\Delta t \cdot \frac{v}{2l} = 2mv \cdot \frac{v}{2l} = \frac{mv^2}{l}. \quad (2.18)$$

Сила f действует на стенку лишь в момент удара в течение времени Δt . Заменим импульс силы $f\Delta t$, действующей в течение 1 секунды, равным ему импульсом постоянно действующей силы за то же время $f\Delta t \cdot \frac{v}{2l} = \bar{f} \cdot 1$.

Тогда второй закон динамики запишется в виде:

$$\bar{f} = \frac{mv^2}{l}. \quad (2.19)$$

\bar{f} – средняя сила взаимодействия молекулы со стенкой в течение одной секунды. В выделенном обратном направлении движется число молекул $n = \frac{1}{3}N$, они будут действовать с силой \bar{F} на грань куба:

$$\begin{aligned} \bar{F} &= \bar{f}_1 + \bar{f}_2 + \bar{f}_3 + \dots + \bar{f}_n = \frac{mv_1^2}{l} + \frac{mv_2^2}{l} + \dots + \frac{mv_n^2}{l} = \\ &= \frac{m}{l}(v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2). \end{aligned} \quad (2.20)$$

Правую часть полученного равенства разделим и умножим на « n »

$$\bar{F} = \frac{mn}{l} \left(\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{n} \right) = \frac{mn}{l} \overline{v^2}. \quad (2.21)$$

Выражение (2.2) дает среднюю квадратичную скорость движения частиц.

$$\left(\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{n} \right) = \overline{v^2} \quad (2.22)$$

Правую и левую части равенства (2.21) разделим на площадь грани (l^2), получим:

$$\frac{\bar{F}}{l^2} = \frac{mn}{l^3} \overline{v^2} \text{ или } \bar{p} = \frac{mn}{l^3} \overline{v^2}. \quad (2.23)$$

Введем в рассмотрение общее число частиц, которое находится в заданном объеме $n = \frac{N}{V}$. Принимая во внимание, что $\frac{N}{V} = n_0$, где n_0 – концентрация (число частиц в единице объема), выражение (2.23) перепишем:

$$\bar{p} = \frac{Nm}{3l^3} \overline{v^2} = \frac{1}{3} n_0 m \overline{v^2}. \quad (2.24)$$

Разделив и умножив правую часть равенства (2.24) на два, получим:

$$\bar{p} = \frac{2}{3} n_0 \frac{m \overline{v^2}}{2} = \frac{2}{3} n_0 \bar{E}_k. \quad (2.25)$$

Уравнение (2.25) называется основным уравнением молекулярно-кинетической теории газа. Согласно этому уравнению среднее значение давления газа на стенку сосуда пропорционально концентрации частиц, среднему значению кинетической энергии молекулы. Последняя, согласно третьему принципу статистики, равна:

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT. \quad (2.26)$$

Подставив (2.26) в основное уравнение МКТ газа (2.25), получим:

$$\bar{p} = \frac{2}{3} n_0 \bar{E}_k = n_0 kT. \quad (2.27)$$

Уравнение (2.27) эквивалентно уравнению (2.25). Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газа выражает прямо пропорциональную зависимость среднего давления идеального газа от числа частиц в единице объема и абсолютной температуры. Статистический характер полученного уравнения обусловлен самим выводом его (использование трех принципов статистики). Справедливость полученного уравнения подтверждается опытами и частными законами.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории позволяет найти соотношения, связывающие между собой параметры, характеризующие состояние системы (p, V, T). Уравнение, общий вид его $\bar{P} = f(V, T)$, связывающее давление, объем и температуру для данной массы газа, получило название уравнения состояния. Названные параметры не являются независимыми, каждый из них является функцией двух других, поэтому состояние системы можно определить двумя параметрами. Например, давлением и температурой, давлением и объемом или объемом и температурой. Третий параметр всегда однозначно определяется двумя другими, его можно вычислить из уравнения состояния, которое можно получить из основного уравнения молекулярно-кинетической теории (2.27). Принимая во внимание, что $n_0 = \frac{N_A}{V_0}$, где (N_A – число Авогадро; V_0 – объем одного моля газа), выражение (2.27) примет вид: $\bar{p} = \frac{N_A}{V_0} kT$ или

$$\bar{P}V_0 = N_A \cdot kT. \quad (2.28)$$

Произведение двух констант ($N_A \cdot K$) можно заменить третьей, универсальной газовой постоянной $N_A \cdot K = R$, тогда

$$PV_0 = RT. \quad (2.29)$$

Выражение (2.29) получило название уравнения состояния идеального газа для одного моля. Умножив левую и правую части последнего равенства (2.29) на число молей $\left(\frac{M}{\mu}\right)$, получим уравнение состояния любой произвольной массы газа $\left(\frac{M}{\mu}V_0 = V\right)$:

$$\bar{P}V = \frac{M}{\mu}RT. \quad (2.30)$$

Равенство (2.30) – уравнение Клапейрона–Менделеева (1874).

Законы Шарля, Гей-Люссака, Бойля–Мариотта. Исследуем уравнение (2.30). Если объем и масса постоянны, то давление пропорционально температуре $\frac{P}{T} = \text{const}$. Эту зависимость экспериментально исследовал Ж. Шарль (1787). При постоянном давлении и массе газа объем, занимаемый газом, прямо пропорционален температуре $\frac{V}{T} = \text{const}$ – закон Ж. Гей-Люссака (1802). Из уравнения Менделеева–Клапейрона при постоянной температуре и массе газа можно получить закон Р. Бойля–Э. Мариотта (1661–1676), связывающий давление и объем газа: $PV = \text{const}$.

Законы Паскаля, Дальтона и Авогадро. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории подтверждает справедливость законов Паскаля, Дальтона и Авогадро. Давление обусловлено некоторым усредненным действием большого числа молекул на стенку (2.27). Принимая во внимание тот факт, что все направления движения молекул равновероятны (координатные оси (x, y, z) могут иметь любые направления), площадку, на которую молекулы газа оказывают давление, можно ориентировать произвольно. Тогда уравнение (2.27) будет справедливо для любой поверхности, т. е. давление газа передается по всем направлениям равновероятно.

Если в заданном объеме содержится смесь газов, то общая концентрация смеси $n = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_i$, где $1, 2, 3, \dots, i$ – число молекул i -го газа в единице объема. Тогда давление смеси газа равно сумме парциальных давлений газов, входящих в смесь:

$$P = n_0 kT = (n_1 + n_2 + \dots + n_i) kT = n_1 kT + n_2 kT + \dots + n_i kT \\ = P_1 + P_2 + \dots + P_i.$$

Пусть в двух сосудах разный газ. Первый содержит N_1 число молекул, они занимают объем V_1 и создают давление $P_1 = \frac{N_1}{V_1} kT$. Во втором сосуде N_2 молекул, они занимают объем V_2 , давление газа в этом сосуде $P_2 = \frac{N_2}{V_2} kT$. Если давление и температура газов одинаковы, то при $V_1 = V_2$; $N_1 = N_2$.

При одинаковом давлении и температуре в равных объемах любого газа содержится одинаковое число молекул (закон Авогадро). В молярном объеме (объеме, занимаемом одним молем любого газа) содержится $6,02 \cdot 10^{23}$ молекул. Это число получило название числа Авогадро.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА. Внутренняя энергия идеального газа – функция состояния идеального газа, как уже отмечалось, она определяется кинетической энергией поступательного движения молекул при некоторой постоянной температуре:

$$\bar{E} = \frac{Nm_1\overline{v^2}}{2}, \quad (2.32)$$

где m_1 – масса одной молекулы; N – число частиц в заданном объеме.

Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории строения вещества следует:

$$\bar{P} = \frac{2}{3}n_0\bar{E}_k = \frac{2N}{3V}\bar{E}_k \text{ или } \bar{P}V = \frac{2}{3}N\bar{E}_k. \quad (2.33)$$

Учитывая, что $N\bar{E}_k = \bar{E}$ из (2.33), получим:

$$\frac{\bar{E}}{\bar{P}V} = \frac{3}{2} \text{ или } \bar{E} = \frac{3}{2}\bar{P}V. \quad (2.34)$$

Принимая во внимание $PV = RT$, перепишем выражение (2.34) в следующем виде:

$$\Delta E = \frac{3}{2}RT. \quad (2.35)$$

Из формулы (2.35) видно, что универсальная газовая постоянная характеризует приращение энергии одного моля газа при изменении его температуры на 1К.

Выражения (2.34) и (2.35) характеризуют внутреннюю энергию одноатомного идеального газа. В общем случае для двухатомного, трехатомного газа $E = \frac{i}{2}RT$, где i – число степеней свободы. Разделив левую и правую части равенства (2.35) на

число Авогадро, получим выражение для средней энергии поступательного движения одной молекулы:

$$\bar{E} = \frac{3R}{2N_A} T, \quad \bar{E} = \frac{3}{2} kT. \quad (2.37)$$

Отношение универсальной газовой постоянной к числу Авогадро носит название постоянной Больцмана:

$$k = \frac{8,31 \text{ Дж/град} \cdot \text{моль}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ 1/моль}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/град.}$$

Постоянная Больцмана – универсальный коэффициент. С одной стороны, его можно рассматривать как переводной коэффициент между единицами измерения температуры (один джоуль и один кельвин); с другой стороны, он оценивает изменение энергии одной молекулы при изменении температуры на 1 К.

На основании (2.37) можно заключить, что средняя энергия поступательного движения одной молекулы (внутренняя энергия) зависит только от температуры.

Температура. Мы описали ее как эмпирический параметр системы. При этом отмечали, что при соприкосновении равновесных систем (поток энергии от одной к другой равен нулю) температура систем одинакова. В молекулярно-кинетической теории, согласно (2.37), температура определяется через среднюю кинетическую энергию молекул. Например, поток энергии от одной системы к другой будет равен нулю, если средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул одной системы будет равна средней кинетической энергии молекул другой системы. При выполнении этого условия система будет иметь одинаковую температуру. При взаимодействии молекул будет происходить лишь обмен энергиями между ними. Если среднее значение кинетической энергии молекул не меняется, то нельзя ли эту величину выбрать за меру температуры ($T = \frac{2\bar{E}}{3k}$)? Последнее соотношение позволит трактовать температуру как статистический параметр, который можно получить путем усреднения кинетической энергии огромного числа молекул.

Теплоемкость. Количество теплоты, которое необходимо сообщить системе, чтобы изменить ее температуру на один градус, получило название теплоемкости. Теплоемкость, отнесенная к единице количества вещества, называется удельной (к 1 кг вещества – массовой; к 1 моль вещества – мольной). Единицы измерения удельной теплоемкости соответственно 1 Дж/кг · град; 1 Дж/моль · град. Связь между ними выражается соотношениями:

$$C = \mu c; \quad C = \frac{1dQ}{\nu dT}; \quad c = \frac{1dQ}{M dT}. \quad (2.38)$$

Количество теплоты не является функцией состояния системы. Эта физическая величина характеризует процесс, в результате которого тело перешло в новое состояние, поэтому теплоемкость тоже определяется этим процессом. Если процесс идет при постоянном давлении, то молярная теплоемкость:

$$C_p = \frac{1dQ_p}{\nu dT}, \quad (2.39)$$

где ν – число молей; C_p – молярная теплоемкость при постоянном давлении.

Если систему перевели в новое состояние при постоянном объеме, то:

$$C_v = \frac{1dQ_v}{\nu dT}, \quad (2.40)$$

C_v – молярная теплоемкость при постоянном объеме. Индексы «р» и «v» при «dQ» означают, что подвод тепла осуществляется при наблюдении постоянства «р» и «V». Найдем выражения для C_p и C_v .

$$C_v = \frac{1dQ_v}{\nu dT} = \frac{1du}{\nu dT} = \frac{1(d(v\frac{i}{2}RT))}{\nu dT} = \frac{i}{2} R. \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned} C_p &= \frac{1dQ_p}{\nu dT} = \frac{1(du+PdV)}{\nu dT} = \frac{1du}{\nu dT} + \frac{1PdV}{\nu dT} = C_v + \frac{1}{\nu} P \frac{d}{dT} \left(\frac{VRT}{P} \right) = \\ &= C_v + R = \frac{i+2}{2} R. \end{aligned} \quad (2.42)$$

Уравнение, связывающее C_p и C_v :

$$C_p = C_v + R \quad (2.43)$$

было получено Р. Майером и носит его имя. Отношение теплоемкостей (2.44) –

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{i+2}{i} \quad (2.44)$$

важная константа, зависящая только от числа степеней свободы молекул газа, получила название показателя адиабаты, или коэффициента Пуассона, (γ входит в уравнение Пуассона $PV^\gamma = \text{const}$, характеризующее адиабатный процесс в газе).

Для большинства твердых тел экспериментально было установлено, что молярная теплоемкость есть величина постоянная, равная ≈ 25 Дж/моль К (закон Дюлонга и Пти). Для объяснения этого факта классическая теория теплоемкости твердых тел опирается на классическую теорему о равномерности распределения энергии по степеням свободы.

Атомы в твердом теле совершают колебательное движение в узлах решетки. На одну степень свободы колебательного движения приходится энергия kT . Число колебательных степеней свободы – 3. Тогда внутреннюю энергию одного моля твердого тела можно определить так:

$$U = N_A \cdot \bar{E} = N_A \cdot i E_i = N_A \cdot kT = 3N_A \cdot kT = 3RT, \quad (2.45)$$

здесь \bar{E} – средняя энергия атома; i – число степеней свободы; E_i – энергия на одну степень свободы. Учитывая, что изменение объема при нагревании твердых тел незначительно, можно пренебречь работой расширения и на основании первого закона термодинамики записать: $dQ \approx dU$. Тогда молярная теплоемкость твердых тел определится так:

$$C = \frac{dQ}{dT} \approx \frac{du}{dT} = \frac{d(3RT)}{dT} = 3R. \quad (2.46)$$

Полученный результат совпадает с опытными данными (закон Дюлонга и Пти) при высоких температурах.

Из (2.46) видно, что теплоемкость твердых тел не зависит от температуры. Это вывод, полученный с опорой на модель идеального газа, справедлив лишь при «умеренных» температурах.

Опыт показывает, что в широком интервале температур теплоемкость газов растет с температурой, как если бы молекулы газа при разных температурах имели разное число степеней свободы. При низких температурах (начиная с определенной для каждого вещества температуры, названной температурой Дебая) теплоемкость твердых тел уменьшается и стремится к нулю при $T \rightarrow 0$. Зависимость теплоемкости твердых тел от температуры в широком интервале температур объяснила квантовая теория теплоёмкости.

Свойства конденсированных систем с точки зрения молекулярно-кинетической теории строения вещества. Одно и то же вещество в зависимости от внешних условий может находиться в трех состояниях: газообразном, жидком и твердом. Два последних можно представить как конденсированные газовые системы, свойства которых можно объяснить на основании молекулярно-кинетической теории. Два важнейших фактора будут определять состояние и свойства вещества: характер и интенсивность беспорядочного движения частиц и наличие сил взаимодействия между ними.

Движение молекул характеризуется скоростью движения, она определяет кинетическую энергию частиц. В зависимости от того, каково ее значение, различают состояние более или менее интенсивного движения молекул. Взаимодействие молекул определяется величиной сил притяжения и отталкивания. С увеличением расстояния между частицами силы взаимодействия убывают, с уменьшением расстояний – возрастают. С другой стороны, расстояние между молекулами характеризует значение потенциальной энергии взаимодействующих частиц. Меньшему расстоянию соответствует меньшая потенциальная энергия, большему расстоянию – большая энергия. Кинетическая и потенциальная энергии, соотношения между ними определяют важнейшие свойства вещества.

Рассмотрим три состояния вещества в условиях их фазового перехода. Плотность газообразных веществ много меньше,

чем жидких и твердых. Это обусловлено различными расстояниями между молекулами. В газообразных веществах они значительно меньше, а силы взаимодействия настолько маленькие, что ими можно пренебречь. В отсутствие сил молекулы газообразных веществ двигаются равномерно и прямолинейно, их движение поступательное. Встречая на своем пути другие молекулы, они взаимодействуют с ними в момент соударения, при этом изменяются направления их движения. В новом направлении частицы опять движутся равномерно и прямолинейно до встречи со следующими молекулами. Таким образом, траектория движения отдельной молекулы представляет ломаную бесконечно длинную линию. Длина свободного пробега молекулы, ее направление и скорость будут определяться статистическими закономерностями. Описанный характер движения молекул характеризует важное свойство газа – занимать весь объем, предоставленный ему.

В жидком состоянии между молекулами расстояние меньше, чем в газах. Поэтому плотность жидкости больше плотности газа. Например, плотность воды при температуре кипения и атмосферном давлении в 1000 раз больше плотности насыщенного пара при тех же условиях. Принимая во внимание все сказанное, можно заключить, что силами молекулярного взаимодействия в жидкости уже нельзя пренебречь. Движение частиц происходит под действием равнодействующей сил взаимодействия молекулы с окружающими ее соседними молекулами. Это движение неравномерное и криволинейное, его можно описывать вторым законом Ньютона. Путь частицы извилистый, его можно сравнить с движением дождевого червя. Принимая во внимание довольно плотную упаковку частиц жидкости, можно предположить, что движение молекул будет сильно ограничено окружающими молекулами, которые образуют своеобразную ячейку. Некоторое время молекула движется внутри данной ячейки, ее движение в ней (беспорядочное метание взад и вперед, вправо и влево) можно сравнить с колебательным движением. Получив

значительный импульс, молекула может из одной ячейки перейти в другую. Движение молекул жидкости является колебательным и поступательным. Благодаря постоянному перераспределению их по всему объему, можно объяснить важнейшее свойство жидкости – текучесть.

Плотность твердого тела больше плотности жидкости. Благодаря более сильному сближению молекул твердого тела сила взаимодействия между частицами возрастает настолько, что теперь движение молекулы ограничено только объемом одной ячейки. Строгий порядок молекул твердого вещества обуславливает его внутреннюю структуру – пространственную решетку. В таких условиях частицы только колеблются вокруг некоторых положений равновесия, сохраняя свое положение относительно друг друга. Благодаря этому твердые тела сохраняют свою форму и препятствуют ее изменению.

Условия фазового перехода веществ можно объяснить, анализируя энергетическое их состояние. Если подвода тепла нет, то движение частиц сопровождается взаимным превращением кинетической энергии в потенциальную, но так, что суммарная энергия системы сохраняется. Пренебрегая силами взаимодействия между молекулами газообразных веществ, будем считать, что частицы обладают только кинетической энергией, для них нет ячеек (потенциальных ям), которые соответствуют их равновесному положению. В жидкостях молекулы внутри ячейки имеют минимальную потенциальную энергию (наибольшую отрицательную величину). Положение молекулы внутри ячейки соответствует положению равновесия, около которого она совершает колебательное движение. Говорят, молекула находится в потенциальной яме (положение с минимальной потенциальной энергией). Потенциальная яма внутри ячейки не является достаточно глубокой. Молекула вследствие столкновений приобретает значительную кинетическую энергию, за счет этого она может преодолеть потенциальный барьер и выйти за пределы ямы (ячейки).

При этом молекула оказывается в другой потенциальной яме другой ячейки. Если ячейки расположены вблизи поверхностного слоя жидкости, то молекулы, обладающие большой кинетической энергией, преодолев потенциальный барьер, могут выйти за ее пределы. При этом вещество перейдет в новое фазовое состояние – газообразное, полная внутренняя энергия которого больше полной внутренней энергии жидкого состояния.

В твердом теле потенциальная энергия молекул преобладает над кинетической энергией их теплового движения. Значительные по величине силы взаимодействия обуславливают относительно глубокие потенциальные ямы. Это состояние частиц соответствует положению устойчивого равновесия. Из трех состояний вещества в твердом теле потенциальная энергия молекул наименьшая (отрицательное значение ее наибольшее), а положение, соответствующее этой энергии, наиболее устойчивое.

Если твердому телу сообщить дополнительное количество теплоты, то интенсивность теплового движения молекул возрастает. Амплитуда колебаний молекулы вокруг некоторых положений равновесия увеличивается. Незначительное возрастание энергии колеблющейся молекулы приводит к гармоническим колебаниям частицы под действием квазиупругой силы. При сближении молекул силы отталкивания возрастают быстрее, чем силы притяжения. Поэтому рост кинетической энергии движения молекул приводит к увеличению размаха колебаний. Возросшие силы отталкивания уменьшают сближение частиц. Силы уже не будут квазиупругими, а колебания молекул станут ангармоническими. Узлы кристаллической решетки при описанной ситуации раздвинутся. Этим можно объяснить важное свойство твердых, да и жидких тел тоже. При нагревании те и другие расширяются.

Если кинетическая энергия отдельной молекулы превзойдет высоту потенциального барьера ячейки твердого тела, то она покидает ее, при этом кристаллическая решетка как неподвижная система разрушается. Все подведенное извне тепло пойдет на

разрушение кристаллической решетки, на увеличение внутренней энергии частиц. Процесс перехода вещества из твердого состояния в жидкое при постоянной температуре получил название плавления. Сообщенное тепло идет на увеличение кинетической энергии частиц, а также на увеличение потенциальной энергии молекул (уменьшения отрицательного значения последней). При переходе вещества из твердого в жидкое состояние отрицательное значение потенциальной энергии уменьшается; в газообразном состоянии оно убывает до нуля. Молекулы практически не взаимодействуют друг с другом. Итак, увеличивая интенсивность теплового движения частиц, можно перевести вещество из твердого в жидкое и газообразное состояние.

Проведенные рассуждения позволяют сделать важный вывод. Вещество из газообразного можно перевести в жидкое и твердое состояние путем уменьшения интенсивности теплового движения его молекул (отвод тепла), а также путем увеличения сил взаимного притяжения между молекулами (сжатие). При этом расстояние между частицами уменьшается, потенциальная энергия убывает, система переходит в конденсированное состояние. Возможны процессы обратные.

Проведенные рассуждения свидетельствуют о плодотворности молекулярно-кинетической теории газа. На ее основе можно объяснить многие явления, важнейшие свойства конденсированных систем (твердых и жидких).

Реальные газы. Кинетическая теория газов не учитывала размеров молекул, а также сил взаимодействия между ними. Эта теория оперировала моделью идеального газа, поэтому можно предположить, что все газовые законы, выведенные для идеального газа, носят приближенный характер. Причем, чем сильнее сжат газ, тем отклонения более значительны. В 1873 году голландский физик Ван-дер-Ваальс (1837–1923) в уравнение Клапейрона внес поправки, учитывающие размеры молекул, а также силы взаимодействия между ними.

Приведем пример, убедительно свидетельствующий о том, что при определенных условиях необходимо учитывать собственные размеры молекул. Известно, что в 1 см^3 газа при нормальных условиях содержится $2,7 \cdot 10^{19}$ молекул. Объем, занимаемый молекулой, составляет $8 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3$ (эффективный диаметр молекулы $2,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}$). Тогда объем всех молекул, находящихся в 1 см^3 при нормальном давлении, составляет $\approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3$ ($8 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3 \times 2,7 \cdot 10^{19} \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3$). Если давление газа увеличить до 2500 атмосфер ($2,5 \cdot 10^8 \text{ Па}$), то собственный объем молекул уже составит половину всего объема, занимаемого газом. Приведенный пример убедительно показывает, что при высоких давлениях нельзя не учитывать собственные размеры молекул. В уравнении Клапейрона газ будет занимать объем $(V - b)$, где b – объем несжимаемого газа. По расчетам Ван-дер-Ваальса он равен учетверенному объему всех молекул. Пусть V_1 – объем одной молекулы. Если число молекул в газе (N), то объем всех молекул ($N \cdot V_1$). Покажем, что объем, занимаемый газом (V), больше объема всех молекул ($N \cdot V_1$). (рис. 2.5).

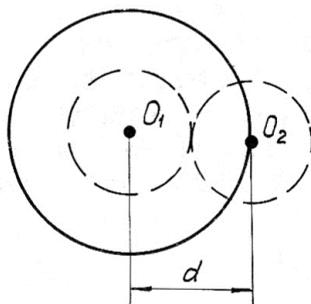


Рис. 2.5

Центры молекул не могут сблизиться на расстояние, большее их удвоенного эффективного радиуса ($2r = d$), т.е. проникнуть в пространство, соответствующее объему шара радиуса

$2r = d$. Объем такого шара равен $4/3\pi(2r)^3 = 8\frac{4}{3}\pi r^3$, т.е. восьмикратному объему одной молекулы ($V_1 = 4/3\pi r^3$). Тогда для каждой из двух выделенных молекул объем несжимаемого пространства соответствует учетверенному объему одной молекулы ($4V_1$). Учитывая это, собственный объем всех молекул составит $b = N4 \cdot V_1 = 4N^4/3 \pi r^3$.

Вторая поправка Ван-дер-Ваальса обусловлена наличием сил взаимодействия между молекулами. Силы притяжения между ними (при достаточно малых расстояниях) как бы увеличивают силы давления внутри газа, помогая внешним силам давления сжимать газ. В уравнении Клапейрона к внешнему давлению Ван-дер-Ваальс добавляет молекулярное давление. По его расчетам, оно обратно пропорционально квадрату объема газа: $p^1 = \frac{a}{v^2}$, где a – некоторый коэффициент пропорциональности, зависящий от природы газа. С учетом поправок уравнение Ван-дер-Ваальса для моля газа принимает вид:

$$(p + \frac{a}{v_0^2})(v_0 - b) = RT. \quad (2.47)$$

Преобразуем это уравнение, для этого раскроем скобки:

$$pv_0 + \frac{a}{v_0} - pb - \frac{ab}{v_0^2} = RT,$$

умножив обе части равенства на $\frac{v_0^2}{p}$ и расположив слагаемые в порядке убывания v_0 , получим:

$$v_0^3 - (b + \frac{RT}{p})v_0^2 + \frac{a}{p}v_0 - \frac{ab}{p} = 0. \quad (2.48)$$

Уравнение (2.48) типа $x^3 + Ax^2 + Bx + C = 0$. Оно имеет два решения: 1) все три корня вещественные; 2) один корень вещественный, два других – мнимые. Если нанести на диаграмму P – V точки, соответствующие вещественным корням уравнения, то получим изотерму Ван-дер-Ваальса (рис. 2.6).

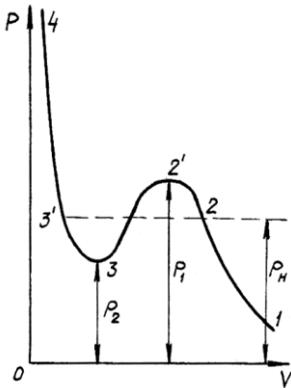


Рис. 2.6

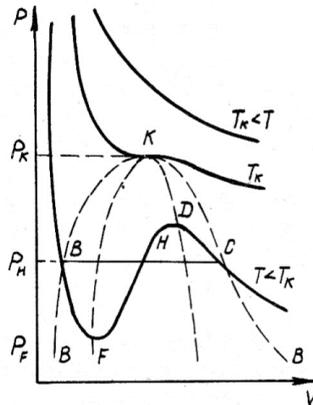


Рис. 2.7

Участок 1–2 прекрасно согласуется с изотермой Эндрюса, полученной экспериментально, он соответствует ненасыщенному пару. Участок 2–3' на опыте получается в виде прямой и соответствует насыщенному пару (пар, давление и плотность которого максимальные при данной температуре). (3'–4) – жидкая фаза вещества. Несовпадение участка 2–3' графика с опытными данными не явилось неожиданным, т.к. этот участок соответствует насыщенному пару, а к нему уравнение Клапейрона неприменимо. Участки изотермы 2–2' и 3–3' при определенных условиях могут быть получены на опыте, они соответствуют перенасыщенному пару (2–2') и перегретой жидкости (3–3').

На рис. 2.7 изображены изотермы Ван-дер-Ваальса для различных температур. Изотерма при T_k соответствует особому состоянию вещества – критическому. В этом состоянии свойства жидкости и газа неразличимы. При температурах выше критической вещество остается в газообразном состоянии. Ни при каком давлении оно не может быть обращено в жидкость. При этих условиях реальный газ можно считать идеальным, все газовые законы можно использовать для описания состояния вещества при температуре выше критической. Уравнение качественно неплохо

описывает свойства реального газа, но не всегда дает верные количественные данные. Причин много, одна из них: введенные поправки «а» и «в» сами зависят от температуры. Тем не менее, несмотря на это, уравнение (2.47) имеет большое значение. Его можно использовать для описания процессов не только в газах, но и в парах и жидкостях.

Внутренняя энергия реального газа. В отличие от идеального, для реального газа необходимо учитывать силы взаимодействия между молекулами. Поэтому внутренняя энергия реального газа складывается из суммы потенциальной энергии взаимодействующих частиц и кинетической энергии теплового движения:

$$u = u_k + u_n.$$

Если система замкнутая, то полная внутренняя энергия системы не меняется. Изменение потенциальной энергии системы вызывает равное и противоположное по знаку изменение кинетической энергии. Другими словами, температура реального газа начнет изменяться. Это явление впервые изучено Джоулем, позднее – Томсоном. Открытый ими эффект получил название эффекта Джоуля–Томсона. Он широко используется в технике сжижения газов. Если расширение газа приводит к его охлаждению (адиабатический процесс), то такой эффект носит название положительного, если, расширяясь, газ нагревается, то такой эффект называется отрицательным. Если температура остается неизменной, то это нулевой эффект. Обнаружено, что при достаточно высоком давлении все газы обнаруживают отрицательный эффект. Как объяснить его на основании молекулярно-кинетической теории?

Если бы между молекулами газа существовали только силы притяжения, то любой газ при расширении должен был бы иметь положительный эффект, т.е. он должен был бы охлаждаться. При расширении газа совершается работа против сил сцепления за счет кинетической энергии частиц. Она убывает, это приводит к понижению температуры. Между молекулами вещества действуют не только силы притяжения, но и силы отталкивания,

которые при сближении молекул сильно увеличиваются. В сжатом состоянии они преобладают над силами притяжения. При расширении газа потенциальная энергия взаимного отталкивания молекул будет преобразована в кинетическую энергию поступательного движения частиц, при этом скорость движения молекул в результате расширения газа возрастает, расширяясь, он нагревается.

Явления переноса с точки зрения молекулярно-кинетической теории строения вещества. Явления диффузии, теплопроводности и внутреннего трения имеют много общего, если их анализировать с точки зрения МКТ, поэтому эти явления объединены общим названием «явления переноса»; рассмотрим их механизм.

Явление диффузии на основании теории получает простое объяснение. Пусть в некотором сосуде находятся два различных газа, разделенные перегородкой. Уберем ее, начнется самопроизвольный процесс взаимного проникновения молекул одного газа в промежутки между молекулами другого. Стремление газа занять как можно больший объем является прямым следствием беспорядочного движения молекул. Молекулы одного газа переходят в одну сторону, молекулы другого газа – в другую. Их перераспределение будет происходить до тех пор, пока не выровняются парциальные давления газов.

Теплопроводность – это процесс самопроизвольного переноса энергии от одного тела к другому. Этот процесс возникает при условии, когда температуры тел различны. Средняя кинетическая энергия молекул одного тела (системы) больше средней кинетической энергии молекул другого. При взаимодействии (соприкосновении) этих тел средняя кинетическая энергия молекул будет перераспределяться до тех пор, пока не выровняются их температуры. Система при этом достигнет равновесного состояния.

Внутреннее трение можно рассматривать как перенос количества движения ($m\vec{v}$) от одного слоя жидкости к другому.

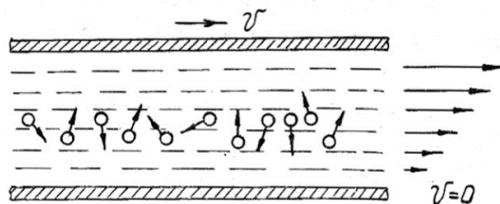


Рис. 2.8

Пусть газ находится между двумя пластинами, одна из которых движется со скоростью \vec{v} (рис. 2.8). В газе возникает внутреннее трение, какова причина его появления? Разобьем весь объем газа между пластинами на тонкие параллельные слои. Скорость направленного движения молекул в слоях различна. Молекулы, расположенные вблизи подвижной пластины, будут иметь скорость примерно такую же, как и пластина. Нижний слой газа имеет скорость, почти равную скорости неподвижной пластины. Молекулы газа в слое обладают не только скоростью направленного движения, но и скоростью (импульсом) теплового движения, поэтому при движении они будут переходить от слоя к слою. При этом количество движения молекул одного слоя уменьшается, другого – увеличивается. Происходит самопроизвольный перенос количества движения от верхнего слоя к нижнему, и наоборот. Описанное движение частиц вызывает силы внутреннего трения.

Процессы диффузии, теплопроводности, внутреннего трения – самопроизвольные и необратимые, они приводят к выравниванию параметров системы. Примечательно то, что они не могут протекать в обратном направлении без внешних воздействий.

Известно, что отдельные молекулы движутся по законам механики. Механические же процессы всегда обратимы. Например, незатухающие колебания тела на упругой пружине и другие

процессы, происходящие в среде без сопротивления и не вызывающие превращений механической энергии во внутреннюю, – обратимы. Если отдельная молекула следует законам механики и ее движение можно считать обратимым, то к совокупности молекул, как было сказано выше, неприменимы законы механики. Статистический метод описания молекулярных систем на основе представлений о вероятности систем решает проблему необратимости процессов. Рассеянная теплота (внутренняя энергия) вновь превратиться в механическую энергию не может. Опыты показывают, что необратимые процессы в одном направлении протекают самопроизвольно (расширение газа, переход тепла от нагревательного тела к холодному). В обратном направлении эти процессы могут быть осуществлены только в результате работы внешних сил.

Основные понятия и принципы термодинамики. Термодинамика раскрывает новые возможности (объяснительную силу) молекулярно-кинетической теории газов. Здесь находит она новую область применения, новые элементы знания связывает в единую систему так, что молекулярно-кинетическая теория позволяет охватить и объяснить с единой точки зрения результаты, достигнутые в термодинамике.

Термодинамика изучает тепловые свойства макроскопических систем. В отличие от статистической физики, она не рассматривает микроскопическое строение тел, входящих в данную систему. По отношению к МКТ термодинамика – феноменологическая теория, она строится на основе принципов – начал термодинамики. Рассмотрим и проанализируем их на основе молекулярно-кинетической теории газов. Термодинамика применена к системам, которые находятся в состоянии теплового равновесия. Эти системы характеризуются небольшим числом параметров (p, V, T), значения которых не меняются со временем. Состояние такой системы, как отмечалось, характеризуется функцией состояния.

Первое начало термодинамики (Р. Майер – 1842; Г. Гельмгольц – 1847) устанавливает, что внутренняя энергия является функцией состояния, ее изменение определяется разностью между количеством тепла (Q), сообщенным системе, и работой (A), совершенной системой:

$$\Delta U = Q - A,$$

где Q – теплота, сообщенная этой системе извне;

A – работа, совершаемая самой системой.

Расширяясь, газ совершает работу против внешних сил, это приводит к его охлаждению, т.е. уменьшению средней кинетической энергии движущихся молекул (внутренней энергии). При сжатии газа работу совершают внешние силы, вызывая его нагревание. При этом средняя кинетическая энергия частицы увеличивается, теплота, сообщенная газу извне, как было рассмотрено выше, приведет к увеличению температуры системы, стало быть, средней кинетической энергии движения молекул (внутренней энергии). Первое начало термодинамики – это обобщенный закон сохранения энергии применительно к тепловым процессам. Проанализируем его для изопроцессов, происходящих в идеальном газе.

1. Изотермический процесс: $m = \text{const}$; $T = \text{const}$. Процесс осуществляется в идеально теплопроводных системах. Если при переходе системы из одного состояния в другое температура не меняется, значит, среднее значение кинетической энергии системы остается постоянным, тогда ее изменение равно нулю ($U = E_k = \text{const}$, или $\Delta U = 0$). Все подведенное количество тепла пойдет на совершение работы $Q - A = 0$ или $Q = A$.

2. Изохорический процесс: $m = \text{const}$; $V = \text{const}$. В результате этого процесса все подведенное к системе тепло пойдет на увеличение температуры, т.е. внутренней энергии газа. При этом давление, оказываемое молекулами, возрастает. Работа газа

при изохорическом процессе равна нулю, поэтому математическое выражение первого начала термодинамики будет иметь вид: $\Delta U = Q$.

3. Изобарический процесс: $m = \text{const}$, $p = \text{const}$. Подведенное к системе тепло в результате этого процесса пойдет на совершение работы ($A = p\Delta V$) и на увеличение температуры молекул газа пропорционально объему, занимаемому этим газом. Последнее приводит к изменению внутренней энергии молекул газа. Принимая во внимание все приведенные рассуждения, первое начало термодинамики для данного процесса запишем в виде: $\Delta U = Q - A$.

4. Адиабатический процесс осуществляется в системах идеально не теплопроводных $Q = 0$. Тогда изменить внутреннюю энергию идеального газа можно в процессе совершения работы $A = -\Delta U$.

В процессе совершения работы изменяются параметры, характеризующие состояние этой системы: p , V , T . Уравнение адиабаты $pV^\gamma = \text{const}$, где $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$.

Первое начало термодинамики позволяет дать энергетическое описание процессам. Вместе с тем рассмотренный пример свидетельствует о взаимодействии термодинамического описания процессов и их молекулярно-кинетического объяснения.

Второе начало термодинамики определяет направление процесса. Оно указывает на необратимость процесса передачи одного вида энергии (работа) в другой (теплота). Работа – мера изменения энергии упорядоченного движения системы как целого: количество тепла – мера изменения энергии неупорядоченного хаотического движения частиц этой системы. Второе начало утверждает, что упорядоченное движение в неупорядоченное может переходить самопроизвольно. Обратный процесс – переход неупорядочен-

ного движения системы в упорядоченное – возможен лишь при условии совершения работы внешними силами. Объяснить физический смысл второго начала термодинамики можно на основании кинетической теории газов, основанной на использовании статистического метода. Этот метод описания молекулярных систем решает проблему необратимости процессов на основе представлений о вероятности состояний. Он позволяет выяснить физический смысл второго начала термодинамики.

Рассмотрим мысленно на основании этого метода распределение молекул газа по занимаемому им объему. Сосуд разделен перегородкой на две равные части. Пусть в сосуде только две молекулы. Вероятность того, что обе молекулы окажутся в одной половине сосуда, равна, согласно теореме умножения вероятностей: $\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}$. Эта теорема утверждает: вероятность совмещения нескольких независимых событий равна произведению вероятностей этих событий. Это значит, в 25-и наблюдениях из 100 молекулы будут вместе (в одной половине сосуда), а в 75-и наблюдениях одна молекула будет в одной половине сосуда, вторая – в другой. Уже в случае двух молекул вероятность неравномерного распределения молекул по сосудам окажется в три раза больше вероятности равномерного распределения. Как изменится эта вероятность при увеличении числа частиц? При $n = 3$, вероятность обнаружить все три частицы в одной половине сосуда составит $\left(\frac{1}{2}\right)^3 = \frac{1}{8}$. При $n = 4$, она будет равна $\frac{1}{16}$. При $n = 100$, вероятность такого события окажется равной $\frac{1}{2^{100}}$. Известно, что в 1 см^3 содержится $2,7 \cdot 10^{19}$ молекул. Вероятность того, что все они окажутся в одной половине сосуда составит $\frac{1}{2^{2,7 \cdot 10^{29}}} = \left(\frac{1}{2}\right)^{2,7 \cdot 10^{29}}$. Число это настолько маленькое, что невозможность данного события (сбора всех частиц в одной половине

сосуда) можно считать достоверностью. Наиболее вероятное состояние газа будет такое, при котором примерно одинаковое число молекул будет в одной и другой части сосуда, поскольку все направления движения частицы равновероятны. Любые отклонения от такого беспорядочного распределения молекул по местам и скоростям связано с уменьшением вероятности. Процессы, которые приводят к равновесному состоянию системы, наиболее вероятны. Второе начало термодинамики устанавливает стремление всех тел к наиболее вероятному равновесному состоянию.

Степень беспорядочности молекулярного движения удобно характеризовать величиной, пропорциональной логарифму вероятности:

$$S = k \ln W, \quad (2.50)$$

где k – постоянная Больцмана; W – вероятность состояния; S – энтропия (формула Л. Больцмана, 1875).

Поскольку вероятность сложного события равна произведению вероятностей, то энтропия сложной системы равна сумме энтропии (при умножении чисел их логарифмы складываются). Поэтому и удобно характеризовать беспорядочность движения молекул энтропией.

Если состояние системы может быть осуществлено только одним способом, то его вероятность равна 1, а энтропия $S = k \ln 1 = 0$. Как правило, энтропия упорядоченных систем равна нулю.

Процесс перехода системы из какого-либо состояния 1 (с вероятностью W_1) в состояние 2 (W_2) характеризуется изменением энтропии:

$$\Delta S = k \ln \frac{W_1}{W_2}. \quad (2.51)$$

Если процесс обратимый (т.е. система в результате процесса возвратилась в исходное состояние), то $W_2 = W_1$ и изменение энтропии равно нулю. Опыт показывает, что все реальные

процессы необратимы, т.е. протекают таким образом, что любая система переходит в более вероятное состояние ($W_2 > W_1$), а это означает (согласно 2.51), что энтропия возрастает. Таким образом, в общем случае можно записать:

$$\Delta S \geq 0. \quad (2.52)$$

Энтропия изолированных систем не убывает. Это утверждение, сформулированное Р. Клаузиусом (1850), называется «неравенством Клаузиуса» и представляет собой математическую формулировку второго начала термодинамики.

Выше мы говорили, что второе начало определяет направление протекания процессов в природе. Конкретизируя это утверждение, можно сказать, что все реальные процессы идут с возрастанием энтропии. Возрастание энтропии означает переход системы в более вероятное состояние; сглаживание градиентов (перепадов) температуры, давления, плотности; стремление к равномерному распределению.

Применяя закон возрастания энтропии ко всей Вселенной, Клаузиус и ряд других ученых пришли к так называемой «теории тепловой смерти Вселенной». Кратко суть этой теории в следующем: поскольку энтропия Вселенной растет (т.е. переход упорядоченного движения в неупорядоченное необратим), то в далеком будущем все виды энергии перейдут в энергию теплового хаотического движения, все градиенты выровняются, материя и энергия рассеются до равномерного распределения, всеобщего хаоса. Церковники всех мастей ухватились за эту теорию как научное доказательство предсказанного Библией «конца света».

Критику «теории тепловой смерти Вселенной» впервые дал Ф. Энгельс в «Диалектике природы». Энгельс, опираясь на общие законы диалектического материализма, утверждал, что материя и движение вечны и неуничтожимы и не утратят ни один из своих атрибутов (неотъемлемых черт). Позднее ряд ученых-материалистов убедительно показали несостоятельность «теории тепловой

смерти Вселенной» (А. Эйнштейн, М. Смолуховский, Л. Больцман). Данные современной науки доказывают, что применение формулы (2.52) к Вселенной неправомерно. В огромной Вселенной протекают процессы и с уменьшением энтропии. Яркие тому доказательства – рождение так называемых «сверхновых» звезд и целых звездных ассоциаций. Одни звезды и планетные системы угасают, другие рождаются, в одних уголках Вселенной идут процессы рассеяния энергии, в других – ее концентрация, наблюдается вечный круговорот превращений материи.

Молекулярно-кинетическая теория, построенная на основе гипотез о молекулярном строении тел и свойств молекул, а также принципах статистической физики, моделях, задающих свойства систем, состоящих из большого числа молекул, убедительно доказывает соответствие исходных положений теории выводам (экспериментальным и теоретическим), полученным из ядра теории. Данная теория верно описывает природу явлений, охватывая, как было показано, обширную область ее применения.

ОБОБЩЕНИЯ И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА В ТАБЛИЦАХ, РИСУНКАХ

Таблица 7

Молекулярно-кинетическая теория

Основание		
Факты (теоретические и экспериментальные)	Идеализированный объект	Понятия, физические величины
1. Положения об атомно-молекулярном строении вещества, их опытные обоснования 2. Распределение молекул по скоростям (Максвелл), опытная проверка (Штерн) 3. Оценка размеров, массы, энергии, импульса, скорости движения частиц	Идеальный газ	1. Статистическая система, статистическое распределение 2. Вероятность событий 3. Среднее значение случайных величин 4. Давление газа 5. Температура 6. Внутренняя энергия 7. Длина свободного пробега молекул 8. Средняя квадратичная скорость молекул 9. Постоянные: Больцмана, Авогадро, универсальная газовая постоянная
Ядро		
Принципы		Уравнение теории
1. Равновесное состояние системы 2. Молекулярный хаос 3. Равномерное распределение энергии по степеням свободы ($\epsilon = kT/2$)		$\bar{p} = n_0 kT$
Следствие		
Объяснение явлений, фактов, закономерностей на основании ядра теории		Применение теории
1. Микроскопическое определение температуры, внутренней энергии, давления идеального газа 2. Анализ законов: Бойля–Мариотта, Гей-Люссака, Шарля, Менделеева–Клапейрона, Паскаля, Дальтона, Авогадро		1. К реальным газам, конденсированным системам (твердые тела, жидкости). 2. К анализу основных положений и принципов термодинамики

Анализ законов: Бойля-Мариотта, Гей-Люссака, Шарля, Менделеева-Клапейрона, Паскаля, Дальтона, Авогадро

↑
С Л Е Д С Т В И

Свойства систем, состоящих из большого числа частиц, характер движения и взаимодействия частиц

⇐ Ч т о и з у ч а е т ? ⇒

↑

МОЛЕКУЛЯРНО-

Модель материального объекта: идеальный газ

⇐ КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ⇒

СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

С Р Е Д С Т В А О П И С А Н И Я

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МКТ:

статистическая система, статистическое распределение, вероятность событий, среднее значение случайных величин, температура, внутренняя энергия, длина свободного пробега молекул, средняя квадратичная скорость молекул, постоянная Больцмана, Авогадро

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МКТ:

1. Все вещества дискретны, они состоят из мельчайших частиц, которые находятся в беспорядочном движении.
2. Частицы взаимодействуют друг с другом.
3. Средняя кинетическая энергия частиц прямо пропорциональна абсолютной температуре

Применение: 1) к реальным газам и конденсированным системам; 2) анализ основных положений и принципов термодинамики

↑
И И Е

Тепловые явления: броуновское движение, диффузия, вязкость, теплопроводность, тепловое расширение, поверхностное натяжение

↑ Принципы статистики:

1. равной вероятности допустимых состояний
2. молекулярного хаоса

С А Н И Я

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ МКТ

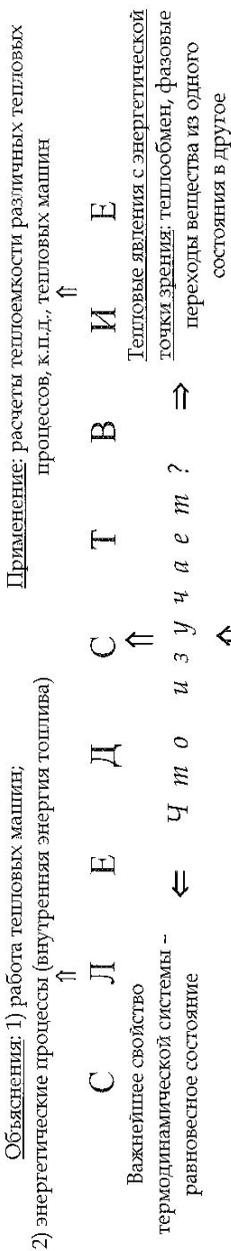
$$\bar{\rho} = \frac{2}{3} n_0 \bar{E}_k; \bar{E}_k = \frac{3}{2} kT; \bar{p} = n_0 kT;$$

$$\bar{v}^2 = \frac{3kT}{m}; m = \frac{\mu}{N_A}; \bar{\lambda} = \frac{\bar{v}}{Z};$$

$$\sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}; v_g = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}; v = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}};$$

$$\bar{Z} = 4\sqrt{2} N \pi r^2 v; \bar{\lambda} = \frac{1}{4\sqrt{2} N \pi r^2}$$

Рис. 2.8. Граф-схема основного содержания молекулярно-кинетической теории строения вещества



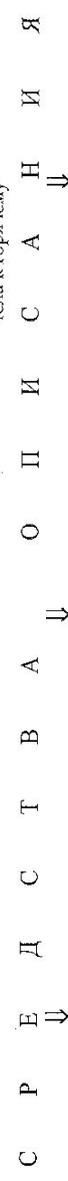
Важнейшее свойство термодинамической системы – равновесное состояние

Модель материального объекта: идеальный газ

⇐ ТЕРМОДИНАМИКА ⇒

Принципы (начала) термодинамики:

1. Изменить внутреннюю энергию термодинамической системы можно в процессе теплообмена и совершении работы
2. Возможен процесс, единственным результатом которого была бы передача энергии путем теплообмена от холодного тела к горячему



ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ:

Давление, объем, температура, внутренняя энергия, количество теплоты, работа, совершаемая системой и над системой (полезная, совершенная), изопроцессы

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ

1. $\Delta U = Q - A$.
 2. $\eta = \frac{A_c}{A_s}$; $\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_1}$; $\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_1}$; $PV = const$; $U_\mu = \frac{i}{2} RT$; $U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} RT$
- $\left(\Delta u = \frac{m}{\mu} R \Delta T = \frac{m}{\mu} C_V \Delta T \right)$; $Q = C_m \Delta T$

Рис. 2.9. Термодинамика

**Классификация исторических опытов, составляющих базис
молекулярно-кинетической теории строения вещества**

Теоретическое основание	Экспериментальный факт
ОСНОВАНИЕ	
Противоречие между законами классической механики и поведением большого коллектива частиц – статистический закон Д.К. Максвелла (1859) Изучение природы броуновского движения	О. Штерн – экспериментально измерил скорость движения молекул газа (1920) Ж. Перрен – доказательство реальности существования молекул, измерение постоянной Больцмана (1908)
ЯДРО	
Основное уравнение кинетической теории газов	Г. Амонтон – установление прямой пропорциональности между давлением и температурой (1702) И. Лошмидт – определение числа молекул в одном кубическом сантиметре газа при нормальных условиях (1865)
СЛЕДСТВИЕ	
Накопившиеся экспериментальные факты, которые объясняются законами МКТ	Р. Бойль, Э. Мариотт – установление зависимости давления от объема (1661, 1676) Ж. Шарль – установление зависимости давления от температуры (1787) Л. Гей-Люссак – установление зависимости объема от температуры (1802) Дж. Дальтон – установление зависимости растворения газов от их парциального давления (1800) Р. Броун – наблюдение хаотического движения мелких частиц, взвешенных в растворе (1827)

Теоретическое основание	Экспериментальный факт
СЛЕДСТВИЕ	
Накопившиеся экспериментальные факты, которые объясняются законами МКТ (продолжение)	Г. Дэви – осуществление опыта по превращению двух кусков льда в воду за счет выполнения механической работы (1799) Ю. Майер – определение механического эквивалента теплоты (1842)
<i>Опыты по открытию явлений и закономерностей, предсказанных на основе законов МКТ</i>	
Существования абсолютного нуля температуры, а также отступления от закона Бойля-Мариотта при больших сжатиях газов – реальный газ – М.В. Ломоносов (XVIII век) Существование критической температуры – Д.И. Менделеев (1860)	Ш. Коньяр де Латур – опыт по наблюдению критического состояния вещества (1822) Т. Эндрюс – опыты по достижению критической температуры (1861)

Задачи и упражнения

2.1. Как изменилось бы давление в сосуде с газом, если бы внезапно исчезли силы притяжения между его молекулами?

2.2. В закрытом цилиндрическом сосуде постоянного сечения находится газ при нормальных условиях. Сосуд размещен горизонтально и разделен подвижным поршнем в отношении 1:2. В каком отношении поршень будет делить объем сосуда, если меньшую его часть нагреть на $t_1 = 27^\circ\text{C}$, а большую охладить до $t_2 = \text{минус } 123^\circ\text{C}$?

2.3. Баллон содержит сжатый газ при 27°C и давлении $4 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$. Каково будет давление, если из баллона половину массы газа выпустить, а температуру понизить до 12°C ?

2.4. Кусок металла и кусок дерева имеют одинаковую температуру. Почему холодный металл кажется холоднее дерева, а горячий металл – горячее дерева? При какой температуре и металл, и дерево будут казаться на ощупь одинаково нагретыми?

2.5. На подоконнике была оставлена на ночь банка с мутной водой. К утру муть осталась только у той стенки, которая обращена к комнате. В какое время года произведен опыт?

2.6. Сосуд, содержащий некоторое количество азота при температуре $t_1 = 15^\circ\text{C}$, движется со скоростью $v = 100 \text{ м/с}$. Какова будет температура азота (t_2) в сосуде, если передачей теплоты стенкам можно пренебречь? ($C_v = 1050 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град.}$)

2.7. Коэффициент полезного действия некоторой тепловой машины составляет 60% от коэффициента полезного действия идеальной машины, работающей по циклу Карно. Температура нагревателей и холодильников этих машин одинакова. Пар поступает в машину при температуре 220°C , а температура конденсатора машины 60°C . Мощность 314 кВт. Сколько угля расходует машина за 1 час работы? ($g_{\text{угля}} = 3,14 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$).

2.8. Радиус колеса тепловоза $r_0 = 1$ м при $t_0 = 0^\circ\text{C}$. Определить разницу в числах оборотов колеса летом при $t_1 = 25^\circ\text{C}$ и зимой при $t_2 =$ минус 25°C на пути пробега тепловоза $l = 100$ км ($\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5}$ град $^{-1}$).

2.9. Параметры начального состояния газа (p, v, T). Газ изохорно охлаждается, затем изотермически сжимается, после чего изохорно нагревается до температуры T_1 . Найдите график данного процесса в координатных осях (P, T), сравните давление и объем начального и конечного состояний.

2.10. В смесь, состоящую из 20 л воды и 10 кг льда, при 0°C выливается расплавленный свинец, взятый при температуре плавления. Вся смесь принимает температуру 100°C , и 200 г воды обращается в пар. Определить массу вылитого свинца.

ЧАСТЬ III. ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Возникновение теории электромагнитного поля. В середине XIX века, более века назад, английский физик Д.К. Максвелл (1831–1879) создал теорию электромагнитного поля. Он доказал, что все электромагнитные явления можно описать четырьмя уравнениями. Максвелл не «изобрел» их, подобно И. Ньютону, он обобщил идеи ученых, работающих в этой области, в особенности идеи М. Фарадея.

В это время физика электрических и магнитных явлений достигла в своем развитии определенной вершины. Остроградский (русский), Гаусс, Ампер, Био и Лаплас (французы), опираясь на идеи дальнего действия, формулируют законы в строгой, изящной математической форме. Немецкий физик В. Вебер, используя те же идеи, устанавливает закон взаимодействия движущихся электрических зарядов и указывает на связь силы тока с плотностью зарядов и скоростью их упорядоченного перемещения. По сути дела, его концепция объединила электростатику и электромагнетизм того времени.

Взгляды М. Фарадея никак не вписывались в сложившиеся в то время представления о природе электрических и магнитных явлений. Фарадеевская концепция силовых линий и трубок, заполняющих все пространство (идея близкого действия), противоречила ньютоновским представлениям, основанным на принципе дальнего действия (действие на расстоянии). Сторонники сил, действующих на расстоянии, не принимали идеи М. Фарадея всерьез, хотя его экспериментальными результатами восхищались. На его взгляды смотрели как на странное заблуждение, и если не подвергали их открытой критике, то только потому, что авторитет его в научном мире был чрезвычайно высок.

Во второй половине XIX века в новой форме возрождаются картезианские идеи в противовес ньютоновским. В основе этих

идей лежат попытки объяснить немеханические явления движением скрытых сред. Например, кинетическая теория тепла природу теплоты связывает с движением материальных частиц, из которых состоит вещество. Волновая теория света строится на гипотезе волнового эфира. Представления о близкодействии в электрических и магнитных явлениях основываются на мировом эфире, который заполняет все пространство и пронизывает все весомые тела. На этих идеях Фарадей строит общую концепцию электрических и магнитных явлений. Она основывается на экспериментах, гипотезах, интуиции и догадках, математических уравнениях.

Д. Максвелл, опираясь и развивая гипотезу скрытых сред (эфира), ставит перед собой задачу перевести идеи Фарадея на математический язык. Построить единую теорию, математические уравнения которой выражали бы законы Остроградского и Гаусса, Кулона, Ампера, Фарадея, Био и Лапласа и др. В решении поставленной задачи Максвелл использует метод аналогий. По его мнению, физические явления, имеющие неодинаковую природу, нередко имеют сходство, оно может быть более или менее сильным.

Д.К. Максвелл строит модель постоянного электрического поля. В качестве модели рассматривает пространство, заполненное потоками некоторой невесомой жидкости. По его мнению, эта жидкость особого рода (воображаемая), она не обладает свойствами «обычной» жидкости. Главной ее особенностью является то, что она течет в сопротивляющейся среде. Все пространство, заполненное текущей жидкостью, можно, по его мнению, разбить на такие трубки тока, что через поперечное сечение каждой из них за единицу времени будет протекать единица объема жидкости. Эти трубки можно считать единичными. Они не могут быть замкнутыми, так как жидкость течет в сопротивляющейся среде. Каждая из трубок имеет начало (источник) и конец (сток). Такая

модель полностью согласуется с идеей М. Фарадея о силовых линиях. Источник и сток можно соотнести с электрическими зарядами, а трубки тока жидкости – с силовыми линиями. Подобная модель позволила доказать тождественность формул, связывающих физические величины, характеризующие течение жидкости, с аналогичными соотношениями электростатики.

Магнитное поле вне магнитов Максвелл наглядно изображает с помощью тех же трубок тока, только они оказываются замкнутыми. Внутри магнита каждый элементарный магнит имеет кольцеобразные магнитные линии. Подобная модель позволила на основании принципа близкодействия выразить идеи Фарадея в математическом виде.

В математике для обозначения ситуации с источниками поля принимают операцию «дивергенция» (по выражению Максвелла, «конвергенция»). Дивергенция – мера источника. Можно привести пример, поясняющий суть этого математического понятия. Лампочка, являющаяся источником света, обладает положительной дивергенцией. Тьма за окном, поглощающая свет, – отрицательной. Тогда оконное стекло имеет дивергенцию, равную нулю, если число лучей, пришедших из освещенной комнаты, равно числу лучей, ушедших в темноту. Стекло не создает и не поглощает света.

Максвелл записывает уравнение в виде

$$\operatorname{div} \vec{D} = 4\pi\rho, \quad (3.1)$$

где D – индукция электрического поля, ρ – плотность электрического заряда. Физический смысл записанного уравнения очевиден. Заряды являются источником электрического поля. Первое уравнение явилось обобщением известного в то время закона Кулона, теоремы Остроградского–Гаусса. С другой стороны, оно само позволило сделать вывод о том, что силовые линии электрического поля, начинаясь на зарядах, уходят в бесконечность и наоборот: идут из бесконечности и оканчиваются на зарядах.

Математическое выражение второго уравнения:

$$\operatorname{div}\vec{D} = 0 . \quad (3.2)^*$$

Физический смысл уравнения: так как магнитных зарядов в природе не существует, то магнитные силовые линии нигде не начинаются и не оканчиваются – они замкнутые. Второе уравнение Максвелла является обобщением опытов Эрстеда, закона Ампера и др.

Позже Максвелл, используя все тот же метод аналогий, строит модель электромагнитного поля. Он опять рассматривает пространство, заполненное воображаемой жидкостью. В этой жидкости, по его мнению, образуются вихревые трубки. Скорость движения жидкости на поверхности вихрей различна, в результате давление в разных точках этой жидкости неодинаково. Возникает среда с анизотропными свойствами. Такая анизотропная среда подобна магнитному полю. Вихри в ней не что иное как магнитные силовые линии. Они сплошь заполняют пространство, но так, что в слоях между вихрями располагаются слои малых частиц – шарики. Они приводятся во вращение вихревыми трубками. Эти маленькие частицы-шарики в придуманной модели являются электрическими частицами. Под влиянием сил, действующих на эти частицы со стороны вихрей, они могут перемещаться. Их направленное перемещение в проводниках образует электрический ток. В диэлектриках эти частицы лишь смещаются (ток смещения).

Поступательное и вращательное движение частиц приводит в движение (или изменяет скорость движения) вихри трубок. С другой стороны, вихри приводят в движение заряженные частицы, сообщая им поступательное и вращательное движение. С

* Здесь и далее уравнения Максвелла записаны в системе Гаусса (использован исторический подход).

помощью такой модели можно представить электромагнитное поле, процесс его распространения в пространстве. Если в каком-нибудь месте пространства изменяется скорость вращения вихревых трубок, которые, по Максвеллу, соответствуют напряженности магнитного поля, то на электрические частицы начинает действовать сила, приводящая их в движение, эта сила пропорциональна напряженности электрического поля. В результате этих процессов в контуре, охватывающем источник меняющегося магнитного поля, течет электрический ток, а в пространстве возникает новое электрическое поле. Эта зависимость укладывается в математическое уравнение (уравнение Максвелла):

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (3.3)$$

где \vec{B} – вектор магнитной индукции;

\vec{E} – вектор напряженности электрического поля;

c – электродинамическая постоянная, равная скорости света в вакууме;

rot – сокращение от слова rotor – вихрь (Максвелл использовал термин curl – завиток), означает вращение вектора \vec{E} , охватим некоторого источника, которым является переменное магнитное поле, индукция которого \vec{B} . Минус в формуле обоснован правилом Ленца. Направление тока, возникающего в замкнутом контуре в результате электромагнитной индукции, таково, что ток препятствует изменению магнитного потока. Это уравнение является математическим выражением идей М. Фарадея о явлении электромагнитной индукции.

С другой стороны, опираясь на ту же модель, Максвелл доказывает, что движение электрических частиц и их смещение приводит к образованию вихревых трубок (напряженности магнитного поля). Другими словами, магнитное поле возбуждается электрическим током и током смещения. Чтобы пояснить физический смысл понятия «ток смещения», рассмотрим электромаг-

нитные процессы в разомкнутом контуре (рис. 3.1). Пусть участок «1–2» проводника находится в переменном магнитном поле. Возбуждаемая в проводнике электродвижущая сила индукции перемещает свободные электрические заряды к одному (1) или второму (2) концу проводника.

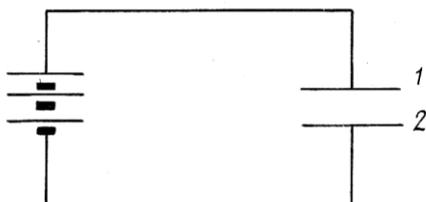


Рис. 3.1

Если переменное магнитное поле вызывает в проводнике переменный индукционный ток, то он, в свою очередь, наводит меняющееся электрическое поле, а меняющееся электрическое поле вызывает магнитное. Такие взаимосвязанные процессы сопровождают перемещение электрических зарядов в проводнике. Это движение обрывается на обкладках (1, 2). Возникает вопрос, какие процессы имеют место в пространстве между обкладками конденсатора? По мнению Максвелла, в пространстве, где существуют переменное электрическое поле, возбуждается магнитное поле, напряженность которого (\vec{H}). Она пропорциональна скорости изменения вектора смещения электрического поля $\frac{d\vec{D}}{dt}$ и лежит в плоскости, перпендикулярной этому вектору. Но если есть магнитное поле, то, согласно опытам Эрстеда, существует какой-то электрический ток, явившийся причиной появления этого поля. Максвелл высказал предположение, что магнитное поле между обкладками (1–2) вызвано особым током, он его назвал током смещения. По его мнению, он может возникать не только в диэлектриках, но и в вакууме, т.е. там, где нет никакого вещества и упорядоченного перемещения электрических зарядов. Главное,

чтобы имелось переменное электрическое поле, которое вызывает и ток смещения, и связанное с ним магнитное поле.

Найдем формулу для расчета силы тока смещения в зависимости от скорости изменения электрического поля. Пусть расстояние между обкладками мало и сосредоточено только в пространстве между ними. Для однородного поля вектор индукции электрического поля

$$D = 4\pi \frac{q}{S}, \quad (3.2)$$

где q – заряд на одной из пластин конденсатора, S – площадь пластины. Так как D и q меняются со временем, то выразим их производные:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{S \partial D}{4\pi \partial t}. \quad (3.5)$$

Согласно предположению Максвелла, в разомкнутом контуре токи смещения замыкают собой токи проводимости в проводнике и по величине равны им. Следовательно, $I = \frac{dq}{dt}$ есть также и ток смещения, а $\frac{I}{S} = j_{\text{см}}$ – есть «плотность этого тока» в пространстве между обкладками конденсатора, поэтому

$$\vec{j}_{\text{см}} = \frac{1 \partial \vec{D}}{4\pi \partial t}. \quad (3.6)$$

Максвелл ввел понятие полного тока, который всегда замкнут. Линии этого тока в некоторой части цепи связаны с упорядоченным движением зарядов в проводнике, в другой части (вне проводника) – с переменным электрическим полем $\vec{J} = \vec{J} + \vec{J}_{\text{см}}$ или

$$\vec{j}_{\text{полн.}} = \vec{j} + \vec{j}_{\text{см}}. \quad (3.7)$$

Вихрь магнитной напряжённости в данной точке поля создаётся двумя способами: током проводимости и током смещения. Плотность тока проводимости обусловлена движением электрических зарядов, а плотность тока смещения – это скорость изменения вектора электрической индукции. Максвелл записывает эту идею в форме уравнения:

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}_{\text{полн.}} \text{ или } \text{rot } \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} + \frac{1 \partial \vec{D}}{c \partial t}, \quad (3.8)$$

где, $\vec{J}_{\text{полн.}} = \vec{j} + \vec{j}_{\text{см}}$, \vec{H} – вектор напряженности магнитного поля. Операция rot означает (можно так выразиться), что вектор напряженности магнитного поля «вращается» вокруг вектора тока плотностью \vec{j} .

К четырем уравнениям Максвелла, описывающим электромагнитное поле, добавляют соотношения, которые позволяют ввести электрические характеристики веществам: ϵ, μ :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}; \quad \vec{B} = \mu \vec{H}. \quad (3.9)$$

Последние уравнения выражают свойства данной среды, их можно назвать уравнениями состояния. Чтобы они приобрели определенность, их добавляют к уравнениям Максвелла, полученная система уравнений может описать основные закономерности электромагнитных явлений в произвольной среде.

Непрерывное электромагнитное поле – идеализированный объект теории. Объектом любой теории является модель некоторого материального объекта. В классической механике идеализированным объектом теории служит материальная точка, в молекулярно-кинетической теории газов – идеальный газ, в теории Д.К. Максвелла – непрерывное электромагнитное поле.

Содержание понятия «идеализированный объект» любой теории можно раскрыть по обобщенному плану, включающему в себя следующее: определение понятия, обоснование необходимости его введения; допущения, задающие свойства идеализированного объекта; методологическую основу понятия; свойства объекта; физические величины, характеризующие его свойства.

Проанализируем содержание идеализированного объекта теории Максвелла по обобщенному плану. Электромагнитное поле (ЭМП) – один из видов материи, в котором и посредством которого в пространстве и во времени осуществляются электромагнитные взаимодействия. ЭМП – это система, обладающая бесконечно большим числом степеней свободы. В нерелятивистских процессах полагалось, что пространство между взаимодей-

ствующими частицами не играет роли в передаче взаимодействия (концепция дальнего действия). В релятивистских процессах изменение состояния одной частицы сопровождается изменением ее энергии, импульса. Эти изменения происходят через конечный промежуток времени. Взаимодействия передаются постепенно от точки к точке (концепция ближнего действия), при этом часть энергии, импульса, отданные одной частицей и еще не принятые другой, принадлежат в течение этого времени полю, их переносящему. Оно является материальным носителем передачи электромагнитного взаимодействия, взаимосвязано с веществом. Электрическое и магнитное поля – частные случаи статического проявления электромагнитного поля.

Электромагнитное поле – один из видов материи, связывающий частицы вещества в системы. Оно материально, универсально и континуально. Для него характерны непрерывность, причинно-следственные связи, отсутствие пространственной локализации. Оно подчиняется принципу суперпозиции, у него ярко проявляются волновые свойства. ЭМП обладает большой проникаемостью, малой концентрацией массы и энергии. Скорость его распространения конечна и равна

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}. \quad (3.10)$$

Взаимодействуя с веществом, оно отражается, преломляется, интерферирует, дифрагирует, поляризуется, вызывает люминесценцию, фотоэффект, химическое действие, производит давление. Электромагнитное излучение характеризуется направленностью. Энергия излучения максимальна в направлении, перпендикулярном электрическому диполю. В процессах превращения энергии ЭМП в другие виды энергии импульс, момент импульса, электрический заряд, масса, полная энергия сохраняются.

В общем случае электромагнитное поле, в каждой его точке, можно описывать физическими величинами: напряженность электрического поля (\vec{E}) электрическая индукция (\vec{D});

напряженность магнитного поля (\vec{H}); индукция магнитного поля (\vec{B}). Свойства среды характеризуются тремя величинами: относительной диэлектрической проницаемостью (ϵ), относительной магнитной проницаемостью (μ) и удельной электрической проводимостью (σ).

Основные понятия и физические величины теории.

Электрический заряд – это важнейшее понятие электронной теории вещества. Но принимая во внимание тесную взаимосвязь ЭМП и электрического заряда, рассмотрим его свойства в этой главе. Электрический заряд (подобно массе) – это свойство частицы вещества. В чем оно проявляется? В способности тел к электромагнитному взаимодействию. Точнее, это мера способности тел к электромагнитному взаимодействию. Электрический заряд так же, как и масса, инвариантен. Его значение не зависит от выбора системы отсчета. Модуль заряда не зависит от скорости движения заряженной частицы. Существуют два рода электрического заряда, условно названные «положительными» и «отрицательными». Тела, имеющие заряды одного знака, отталкиваются, разных – притягиваются. Физические законы симметричны по отношению к операции замены положительного заряда частицы на отрицательный. Иными словами, законы физики не меняют своего вида при замене положительных зарядов на отрицательный. Электричество имеет атомистическую структуру. Существуют частицы с наименьшим по величине электрическим зарядом. Такими частицами являются электрон, протон, входящие в состав атома, обнаружены и другие частицы, имеющие такой же заряд (позитрон, мезоны, гипероны). Наименьший, неделимый электрический заряд в условных единицах заряда электрона составляет $1 (1,6 \times 10^{-19} \text{ Кл})$. Последние исследования в области элементарных частиц показали, что имеются частицы, электрический заряд которых меньше заряда электрона, он составляет $\pm 1/3 \pm 2/3$ в условных единицах от заряда электрона (кварки).

Тело электрически заряжено, если число элементарных отрицательных зарядов больше или меньше положительных. Оно нейтрально, если число положительных зарядов равно числу отрицательных. Если система замкнутая, то какие бы процессы в ней ни происходили, алгебраическая сумма зарядов с течением времени не меняется $\sum_{i=1}^n q_i = \text{const}$. Тела, в которых заряженные частицы могут свободно перемещаться в пределах всего объема, получили название проводников, к ним относятся металлы, электролиты, ионизированный газ. В диэлектриках заряженные частицы могут лишь смещаться относительно некоторых точек. Если электрические свойства одинаковы по всем направлениям, то такие тела называются однородными и изотропными. Измерения показывают, что во многих кристаллах (проводниках) удельное сопротивление неодинаково в различных направлениях, а у ряда диэлектриков различна их электрическая проницаемость. Такие тела называются анизотропными. Большинство тел неоднородны и анизотропны.

Существуют различные методы измерения величины электрического заряда: электростатический (опыты Милликена, Иоффе); электромагнитный (определение величины заряда на основе силы Лоренца); измерение заряда в процессе электролиза, а также путем измерения силы тока и времени его прохождения через поперечное сечение проводника. Макроскопическое тело можно зарядить несколькими способами: электризацией трением (соприкосновением); электризацией через влияние. Наэлектризовать тело – это значит отделить отрицательный заряд от связанного с ним положительного. Различают точечные электрические заряды, т.е. такие, линейные размеры которых много меньше расстояний между ними. Всякое заряженное тело можно рассматривать как совокупность точечных зарядов. Поэтому силу, с которой одно тело действует на другое, можно представить как векторную сумму сил, действующих на каждый точечный заряд второго тела со стороны первого. Взаимодействие неподвижных

точечных электрических зарядов носит Кулоновский характер, в случае движущихся электрических зарядов сила электромагнитного взаимодействия зависит от модуля и направления их скорости и описывается силой Лоренца. Она включает два компонента сил, действующих со стороны электрического и магнитного полей.

Электрическое поле. Напряженность. Любое заряженное тело окружено электрическим полем, которое теоретически простирается до бесконечности. Поле неподвижных зарядов с течением времени не изменяется, оно называется электростатическим. Электрическое поле заряда, движущегося с постоянной скоростью, получило название стационарного.

На пробный заряд, помещенный в любую точку поля, действует сила, стало быть, это поле силовое. Сила, действующая на пробный заряд со стороны поля, пропорциональна величине этого заряда. Но отношение величины силы к величине пробного заряда не зависит от него, поэтому может служить силовой характеристикой данной точки поля, получившей название напряженности. Напряженностью электрического поля в данной точке его называют физическую величину, численно равную отношению силы (\vec{F}), действующей на достаточно малый пробный заряд (q_0) к величине этого заряда ($\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$).

Если в данную точку поля поместить отрицательный заряд, то сила (\vec{F}), действующая на него, и напряженность поля (\vec{E}) направлены в противоположную сторону. Если напряженность во всех точках поля одинакова, то такое поле называется однородным.

Если в электрическое поле поместить не заряд, а проводник, то на свободные заряды в этом проводнике будет действовать сила, для зарядов разного знака она направлена в противоположную сторону. Эти силы вызовут перераспределение зарядов в данном проводнике (рис. 3.2). Внутри него появляется соб-

ственное электрическое поле, напряженность которого \vec{E}_1 . Перераспределение зарядов будет происходить до тех пор, пока напряженность внешнего и собственного полей не сравняются: $\vec{E}_1 = \vec{E}_0$. Перераспределение свободных зарядов в проводниках под действием внешнего электрического поля получило название электростатической индукции. Если внести в электрическое поле диэлектрик, то электрическое поле будет действовать на «связанные» заряды, входящие в состав нейтральных молекул диэлектрика. Нейтральные молекулы диэлектриков можно представить как совокупность электрических диполей. Во внешнем электрическом поле они могут поворачиваться, перемещаться в сторону возрастания напряженности поля (рис. 3.2). При этом внутри диэлектрика заряды начинают располагаться упорядоченно. За пределами диэлектрика суммарное поле (\vec{E}_1) возрастает. Оно складывается из полей внешнего (\vec{E}_0) и собственного (\vec{E}_1). Внутри диэлектрика, как и в случае проводников, напряженность собственного поля направлена против внешнего, а поэтому напряженность результирующего поля уменьшается.

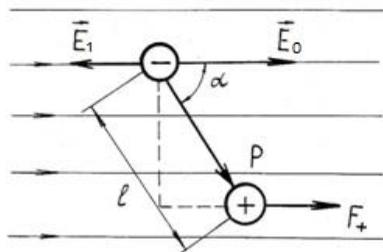


Рис. 3.2

Приведенные рассуждения убедительно свидетельствуют о том, что напряженность поля сильно зависит от свойств среды. Электрические свойства среды характеризует относительная диэлектрическая проницаемость среды (ϵ). Она показывает, во сколько раз напряженность поля в вакууме больше, чем в среде

($\frac{E_0}{E} = \epsilon$). Величина, не зависящая от электрических свойств среды, получила название электрического смещения или электрической индукции ($\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$, $[D] = 1 \frac{\text{ФВ}}{\text{мм}} = \frac{1 \text{Кл}}{\text{м}^2}$).

Теорема Остроградского–Гаусса дала простой метод расчета электрических полей. Но в теорему введена новая физическая величина, характеризующая поле, – поток вектора электрического смещения (индукции) через поверхность. По аналогии с линиями напряженности электрического поля вводят линии электрической индукции. Их направление в каждой точке пространства совпадает с направлением вектора индукции, густота их позволяет судить о величине индукции поля. Число линий индукции, которые пронизывают данную поверхность, называют потоком вектора электрической индукции через данную поверхность, $N = \int D_n ds$, где D_n – проекция вектора D на направление нормали к элементарной площадке ds ; $[N] = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} \text{м}^2 = 1 \text{Кл}$. За единицу потока индукции принимается один Кулон – это такой поток через замкнутую поверхность, которая окружает заряд в 1 Кл.

В однородном электрическом поле с индукцией \vec{D} проведем произвольную плоскость MN (рис. 3.3), нормаль \vec{n} к которой составляет угол α с вектором \vec{D} . Выделим на плоскости участок площадью S . Тогда поток индукции N сквозь поверхность S равен: $N = D \cos \alpha$ или $N = D_n S = DS_n$, где $D_n = D \cos \alpha$, а $S_n = S \cos \alpha$.

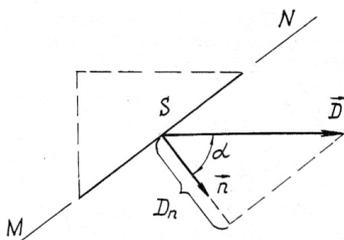


Рис. 3.3

В заключение можно сказать, что в теории Максвелла нашли широкое применение силовые характеристики поля: напряженность, электрическая индукция (смещение), вектор магнитной индукции. Для графического изображения электрического поля пользуются линиями напряженности (индукции). Линиями напряженности называют кривые, касательные к которым в каждой точке совпадают с вектором напряженности (индукции) этого поля.

Магнитное поле. Электрические заряды, которые покоятся относительно выбранной системы отсчета, создают только электростатическое поле. Движущиеся электрические заряды создают вокруг себя, кроме стационарного электрического поля, – магнитное (опыт Эрстеда). Если в исследуемое магнитное поле поместить «пробный» проводник с током, то на него будет действовать сила Ампера, а на движущийся электрический заряд – сила Лоренца. Значит, магнитное поле, так же как и электрическое, – силовое. Аналогично рассмотренному электрическому полю для магнитного поля, помимо вектора индукции магнитного поля (\vec{B}), являющегося его силовой характеристикой, вводят вектор напряженности магнитного поля (\vec{H}). Напряженность магнитного поля является аналогом электрической индукции (\vec{D}), а вектор индукции магнитного поля (\vec{B}) – аналогом напряженности электрического поля (\vec{E}).

Вектор напряженности магнитного поля для однородного и изотропного пространства можно определить как вектор вихревого магнитного поля, образованного макротоками (упорядоченное движение электрических зарядов в проводнике, токи смещения). Вектор магнитной индукции – это вектор вихревого магнитного поля, образованного макро- и микротоками (микротоки – элементарный электрический ток, образованный движением электронов вокруг ядра). Пока отсутствует внешнее поле, вихревое поле микротоков ориентировано беспорядочно, поэтому

результатирующее магнитное поле равно нулю. Внешнее поле макротоков увеличивает пропорционально поле микротоков. Эта связь вихревых полей (макро- и микротоков) может быть выражена формулой:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}; \text{ где } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м,}$$

μ – магнитная проницаемость – постоянная, аналогичная электрической проницаемости – константе электрического поля (ϵ). Записанное соотношение для \vec{B} и \vec{H} справедливо для всех веществ, кроме ферромагнетиков, для которых имеет место нелинейная зависимость $\mu(H)$.

Вектор магнитной индукции – физическая величина, характеризующая силу, действующую на единичный заряд, движущийся с определенной скоростью ($\vec{B} = \frac{\vec{F}}{qv}$ для случая, когда, $\sin \alpha = 1$, где $\alpha(\vec{B}, \vec{v})$). Вектор напряженности электрического поля тоже определяет силу, действующую на заряд. Вектор напряженности электрического поля создается всеми зарядами (свободными и связанными), аналогично вектор магнитной индукции создается как макротоками, так и микротоками. Все это свидетельствует об аналогии этих физических величин, характеризующих поля магнитные и электрические.

Согласно закону Био–Савара–Лапласа вектор магнитной индукции зависит от силы тока в проводнике, создающем магнитное поле, от элемента длины проводника, квадрата расстояния до точки, в которой определяется поле

$$d\vec{B} = k \cdot \frac{Idl \sin \alpha}{r^2},$$

где α – угол между направлением тока и вектором \vec{r} ;

Idl – элемент тока;

$k = k_1 \mu$; $k_1 = \frac{\mu_0}{4\pi}$ коэффициент пропорциональности в системе СИ, тогда: $k = \frac{\mu \mu_0}{4\pi}$.

По аналогии с электрическим полем существует магнитное, которое характеризуется вектором магнитной индукции и магнитным потоком (Φ) сквозь малую площадку (ΔS): $\Phi = \int_S B_n dS$. Для однородного магнитного поля $\Phi = B_n S = BS \cos \alpha$ эта величина имеет исключительно важное значение в исследовании явления электромагнитной индукции.

За единицу вектора магнитной индукции принята 1 Тл – это индукция такого поля, которое действует с силой 1 Н на заряд в 1 Кл, движущийся со скоростью 1 м/с:

$$[\vec{B}] = 1 \text{Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл м/с}} = 1 \frac{\text{Вс}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2}.$$

За единицу напряженности принимают 1 А/м:

$$[\vec{H}] = 1 \frac{\text{Тл}}{\text{Н/м}} = 1 \frac{\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{А/с}}{\text{м}^2 \text{В/м}} = 1 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

За единицу потока вектора магнитной индукции принимают 1 Вб – это поток вектора магнитной индукции в 1 Тл сквозь площадку в 1 м².

Принципы теории. Как уже отмечалось, теория электромагнитного поля основана на идее **близкодействия**, которая возведена в ранг принципа. Взаимодействие между заряженными частицами осуществляется постепенно от одной точки поля к другой с конечной скоростью. Это взаимодействие точечных заряженных частиц описывается законом Кулона. Взаимодействие электрически заряженных частиц с полем описывается силой Лоренца. Количественное описание электромагнитного поля позволяет глубже понять идею близкодействия, это поле присутствует везде, оно непрерывно (континуально).

Принцип суперпозиции выражает фундаментальное свойство электромагнитного поля, он утверждает, что если существует два поля, созданные зарядами q_1 и q_2 , то будет существовать третье, равное сумме этих полей. На основании принципа суперпозиции электрические поля различных зарядов векторно

складываются. Поэтому поток суммарного вектора индукции \vec{D} от нескольких зарядов равен сумме потоков, создаваемых каждым зарядом в отдельности:

$$N = \oint D_n dS = \sum_{i=1}^n q_i; \text{ или } \oint E_n dS = \frac{1}{\epsilon \epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i.$$

Это соотношение записанное в системе СИ выражает теорему Остроградского-Гаусса. Вывод ее сделан на основании принципа суперпозиции. Первое уравнение Д.К. Максвелла $\text{div} \vec{D} = 4\pi \rho$ в Гауссовской системе является обобщением исследований Остроградского-Гаусса.

Объяснение состоит в следующем.

Согласно I теореме Остроградского-Гаусса (математической)

$$\oint D_n dS = \int_V \text{div} \vec{D} dV. \quad (3.11)$$

Согласно II теореме Остроградского-Гаусса (математической)

$$\oint D_n dS = 4\pi q = 4\pi \int_V \rho dV. \quad (3.12)$$

Из сравнения (1) и (2) вытекает первое уравнение Максвелла.

Напряженности (индукции) магнитных полей, которые создаются движущимися электрическими зарядами, тоже складываются. Напряженность магнитного поля в данной точке равна векторной сумме напряженностей, создаваемых в этой точке каждым движущимся зарядом в отдельности. При тепловом хаотическом движении электронов в проводнике суммарное магнитное поле равно нулю. Если в проводнике создать упорядоченное движение заряженных частиц, то вокруг них возникает суммарное магнитное поле, создаваемое каждой движущейся заряженной частицей. Суммарное магнитное поле, созданное движущимися электрическими зарядами, можно рассчитать, используя закон Био-Савара-Лапласа. Закон выведен на основании принципа суперпозиции. В обобщенном виде он вошел во второе и третье уравнения Максвелла. Принцип суперпозиции наряду с принципом неопределенности составляет основной принцип квантовой

механики. Он выполняется и в квантовой теории поля. В этом плане принцип носит почти универсальный характер.

Уравнения Дж. Кл. Максвелла. Исторический подход к анализу явлений позволил записать уравнения Максвелла в дифференциальной форме. В системе СИ уравнения имеют вид:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho; \quad \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \quad \vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E};$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0; \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}.$$

Интегральная запись их в системе СИ имеет следующий вид:

$$\oint_S D_n dS = \int_V \rho dv; \quad \oint E_l dl = \int_S \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right)_n dS;$$

$$\oint_S B_n dS = 0; \quad \oint H_l dl = \int_S j_n dS + \int_S \left(\frac{\partial D}{\partial t} \right)_n dS.$$

Используем другой подход для записи уравнений электромагнитного поля. Для этого воспользуемся понятиями потока и циркуляции поля. Как уже отмечалось, задать электромагнитное поле можно с помощью векторов \vec{E} и \vec{H} или \vec{D} и \vec{B} . Эти векторы являются функциями не только координат (\vec{r}), но и времени (t). При описании таких векторных полей применяют математические понятия «поток» и «циркуляция». Рассмотрим произвольное векторное поле $\vec{A}(\vec{r})$, для которого выразим поток через поверхность S и циркуляцию через контур I , опирающийся на площадь S . В некотором векторном поле ($\vec{A}(\vec{r})$) выделим поверхность (S) (рис. 3.4). В каждой точке этой поверхности вектор должен иметь определенное значение, направление, проекцию на векторную нормаль к поверхности. Поток векторного поля $A(\vec{r})$ через поверхность S равен среднему значению нормальной составляющей вектора A_n , умноженной на площадь поверхности S ($A_n \cdot S$). На

основании данного определения сформулируем первое и второе уравнения поля.

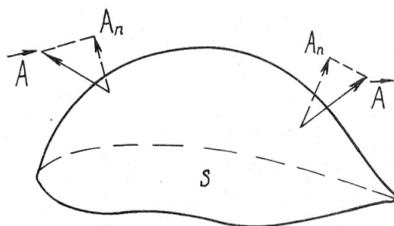


Рис. 3.4

Поток напряженности \vec{E}_n электрического поля через любую замкнутую поверхность прямо пропорционален заряду внутри поверхности: $\oint_S E_n dS = \frac{\sum q_i}{\epsilon_0}$.

Из уравнения следует, что источником электрического поля являются электрические заряды. Силовые линии электрического поля начинаются и оканчиваются на электрических зарядах и уходят в бесконечность (рис. 3.5).

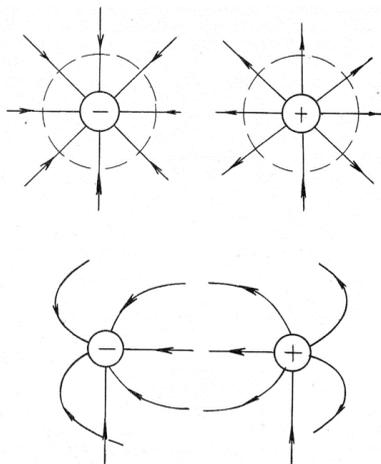


Рис. 3.5

Второе уравнение. Поток напряженности магнитного поля через любую замкнутую поверхность равен нулю: $H_n S = 0$ ($\oint B_n dS = 0$). Из уравнения следует, что магнитных зарядов в природе не существует. Силовые линии магнитного поля замкнуты.

Чтобы описать третье и четвертое уравнения, рассмотрим понятие «циркуляция». Вычертим замкнутый контур l в векторном поле $\vec{A}(r)$ (рис. 3.6). В каждой точке контура можно провести вектор $\vec{A}(r)$, его проекция на касательное направление к контуру имеет знак положительный или отрицательный. Знак проекции определяется направлением обхода контура. Тогда циркуляция векторного поля $\vec{A}(r)$ вдоль контура l равна средней касательной составляющей вектора $\vec{A}(r)$ на длину пути обхода ($A_\tau l$).

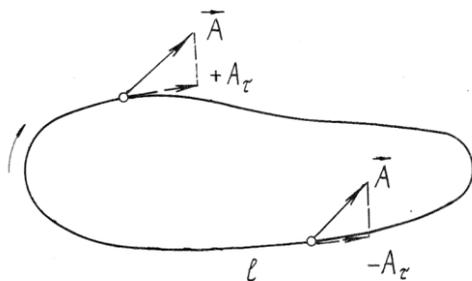


Рис. 3.6

Третье и четвертое уравнения поля записаны для вихревого электрического и магнитного поля, поэтому к ним можно применить понятие «циркуляция».

Циркуляция напряженности магнитного поля вдоль замкнутого контура складывается из электрического тока через поверхность, которая опирается на контур, и потока напряженности электрического поля через ту же поверхность:

$$\vec{H}_l l = j_n S + \frac{\Delta}{\Delta t} \vec{E}_n S \quad \left(\oint H_l dl = \int_S j_n ds + \int_S \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right)_n ds \right). \quad (3.13)$$

Из уравнения видно, что вихревое магнитное поле создается не только токами зарядов, но и переменным электрическим полем.

Четвертое уравнение поля можно сформулировать так: *Циркуляция напряженности (E) электрического поля по контуру (l) пропорциональна потоку напряженности магнитного поля сквозь поверхность S, опирающуюся на контур l:*

$$\bar{E}_l l = -\frac{\Delta}{\Delta t} H_n S \left(\oint E_l dl = - \int_s \left(\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \right)_n ds \right). \quad (3.14)$$

Как уже отмечалось, уравнения Максвелла являются обобщением известных законов: Кулона, Ампера, Остроградского и Гаусса; Био, Савара и Лапласа, Фарадея и др. В то же время все законы постоянных и переменных электрических полей можно изучать на основе системы уравнений Максвелла.

Постоянное электрическое поле. Первое уравнение Максвелла. Поле покоящегося точечного заряда. Первое уравнение поля утверждает, что поток напряженности \vec{E} электрического поля через любую замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов внутри поверхности. Поле точечного заряда является симметричным. Центр симметрии расположен в точке нахождения заряда (Q). Если вокруг него провести сферическую поверхность радиуса r, то напряженность будет одинаковая во всех точках сферы радиуса r: $\bar{E}_n = E$ и перпендикулярна поверхности. $\oint_S E_n dS = \frac{\sum q}{\epsilon_0}$, $E_n = E = \text{const}$, $E \oint_S dS = \frac{\sum q}{\epsilon_0}$, $\oint_S dS = 4\pi R^2$, где $4\pi R^2$ – площадь поверхности сферы. $E 4\pi R^2 = \frac{q}{\epsilon_0}$, $E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2}$, $E = k \frac{q}{R^2}$. Экспериментально проверено, что соотношение для напряженности поля точечного заряда справедливо до расстояний порядка 10^{-16} м. Сила взаимодействия точечных зарядов: $F = Eq = k \frac{Qq}{r^2}$. Это и есть математическое выражение закона Кулона.

Электрическое поле зарядов, распределенных по сфере, линии, плоской поверхности. Если электрический заряд равномерно распределен в пространстве, то электрическое поле на основании принципа суперпозиции может быть рассчитано суммированием (интегрированием) соответствующих характеристик поля, созданного отдельными зарядами. Пусть заряд Q равномерно распределен по сфере радиуса R . Построим две поверхности, одну радиуса r (S_1) вне заряженной сферы, другую внутри сферы (рис. 3.7). Для сферы радиуса r первое уравнение поля имеет вид: $ES_1 = \frac{Q}{\varepsilon_0}$; $E4\pi r^2 = \frac{Q}{\varepsilon_0}$, откуда $E = k \frac{Q}{r^2}$. Для поверхности S_2 получаем $ES_2 = 0$. Зарядов внутри поверхности S_2 нет, поэтому поле внутри заряженной сферы отсутствует.

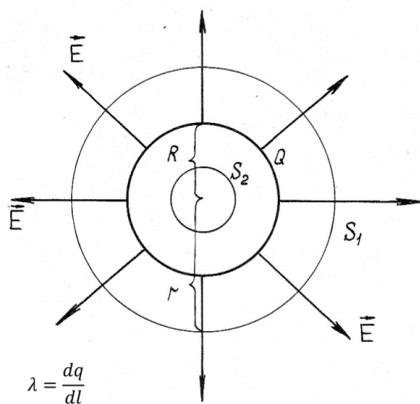


Рис. 3.7

Рассмотрим линейный проводник с линейной плотностью равномерно распределенных зарядов λ (рис. 3.8). В замкнутой поверхности вокруг линейного проводника поток линий напряженности через верхнюю и нижнюю грани поверхности равен нулю, через боковую поверхность S_2 он составляет:

$$E2\pi r l = 4\pi \lambda l,$$

где $\lambda = \frac{Q}{l}$; l – высота поверхности; r – ее радиус.

Выполнив преобразования, получим $E = 2\lambda/r$. Напряженность поля, образованного линейным проводником, зависит от плотности заряда на нем и расстояния r до точки, в которой определяется напряженность поля.

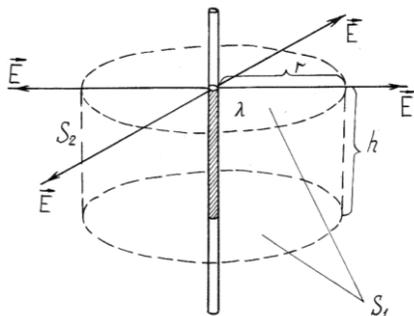


Рис. 3.8

Применив уравнение поля, найдем напряженность поля, созданную *заряженной плоскостью* с поверхностной плотностью зарядов γ (рис. 3.9).

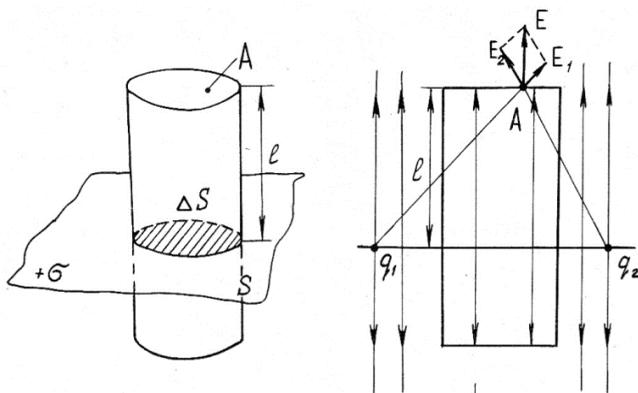


Рис. 3.9

Найдем напряженность поля в точке А, удаленной от плоскости на расстояние l . Мысленно построим цилиндр так, чтобы его образующая была перпендикулярна плоскости. Согласно

симметрии линии напряженности перпендикулярны поверхности. Этот цилиндр является замкнутой поверхностью, заряд находится внутри этой поверхности (заштрихованная поверхность). Поток линий напряженности через боковую поверхность (S_2) цилиндра равен нулю. Поток сквозь основания цилиндра S_1 определяется выражением: $E2\pi r^2 = 4\pi r^2 \pi \gamma$, тогда $E = 2\pi\gamma$; в системе СИ $E = \frac{\gamma}{2\epsilon\epsilon_0}$. Поле между двумя параллельными заряженными поверхностями удваивается: $E = 2 \cdot 2\pi\gamma$ или в СИ: $E = \frac{\gamma}{\epsilon\epsilon_0}$. На внешней поверхности параллельных плоскостей при сложении суммарное поле получается равным нулю.

Все полученные формулы можно вывести из теоремы Остроградского–Гаусса, эта теорема, в свою очередь, в обобщенном виде входит в первое уравнение Максвелла.

Энергия поля. Разность потенциалов точек поля. Пусть в поле точечного заряда Q перемещается пробный заряд q . Эти заряды взаимодействуют по закону Кулона, сила взаимодействия равна $F = k \frac{Qq}{r^2}$. Для перемещения заряда из одной точки поля в другую последнее совершает работу $\Delta A = F\Delta r = k \frac{Qq}{r^2} \Delta r$. Работу переменной силы можно найти суммированием элементарных работ (интегрированием):

$$A = \int_{r_1}^{r_2} F dr = \int_{r_1}^{r_2} k \frac{Qq}{r^2} dr = kQq \int_{r_1}^{r_2} r^{-2} dr = - \left(k \frac{Qq}{r_2} - k \frac{Qq}{r_1} \right). \quad (3.15)$$

Сравнивая полученное выражение с формулой $A = \Delta\Pi$, где Π – потенциальная энергия, можно заключить, что в правой части равенства стоит значение потенциальной энергии электрического поля $\left(k \frac{Qq}{r} \right)$. Энергия, которой обладает единичный пробный заряд, помещенный в данную точку поля, получила название потенциала данной точки поля $\varphi = k \frac{Qq}{r} = k \frac{Q}{r}$. Это энергетическая характеристика поля. Преобразуем выражение:

$$A = - \left(k \frac{Qq}{r_2} - k \frac{Qq}{r_1} \right) = -q \left(k \frac{Q}{r_2} - k \frac{Q}{r_1} \right) = -q(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (3.16)$$

Работа в электрическом поле определяется величиной пробного заряда и разностью потенциалов двух данных точек поля или значением потенциальной энергии этих точек поля. Электрическое поле – поле потенциальных сил, работа в таком поле не зависит от формы пути. По замкнутому контуру она равна нулю.

Электрическое поле диполя. Несимметричное расположение электрических зарядов в молекуле приводит к образованию электрического поля вне ее. Систему, состоящую из двух равных, противоположных по знаку точечных электрических зарядов, расположенных на расстоянии l друг от друга, назвали электрическим диполем. Основной характеристикой диполя является его электрический или дипольный момент – вектор, равный произведению заряда q на расстояние l : $\vec{p} = \vec{q}l$. Этот вектор направлен от отрицательного заряда к положительному (рис. 3.10). За единицу дипольного момента принимают 1 Кл.м.

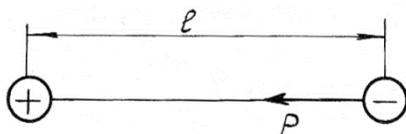


Рис. 3.10

Если электрический диполь поместить в однородное электрическое поле с напряженностью \vec{E} , то на заряды диполя будет действовать пара сил: $\vec{F}_+ = q\vec{E}$; $\vec{F}_- = q\vec{E}$. Эти силы создадут момент пары сил, $M = Fl \sin \alpha = Eq l \sin \alpha = PE \sin \alpha$ или $\vec{M} = \vec{p} \times \vec{E}$. Пара сил вызывает вращающий момент, под действием которого электрический диполь ориентируется так, что его собственное поле направлено против внешнего. Такой электрический диполь будет ослаблять внешнее поле.

ПОСТОЯННОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ, ВТОРОЕ И ТРЕТЬЕ УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА. Поток напряженности \vec{H}_n магнитного поля через любую замкнутую поверхность S равен нулю $\vec{H}_n S = 0$. Опыты Эрстеда убедительно доказали, что вокруг движущихся электрических зарядов возникает магнитное поле, силовые линии которого замкнуты. Направление магнитного поля можно определить по правилу буравчика. Если его поступательное движение совместить с направлением электрического тока в проводнике, то вращение рукоятки буравчика совпадает с направлением силовых линий магнитного поля. Постоянное магнитное поле, вызванное стационарным электрическим током, можно исследовать на основании третьего уравнения поля, выписав в нем величины, зависящие от времени:

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} \text{ или } \vec{H}_\tau l = \frac{4\pi}{c} (j_n S). \quad (3.17)$$

Магнитное поле прямолинейного тока. Пусть заряды движутся с постоянной скоростью вдоль бесконечно длинного проводника, в нем плотность тока $j = \frac{I}{S}$. В качестве замкнутого контура выберем окружность в плоскости, перпендикулярной электрическому току (рис. 3.10). Уравнение $\vec{H}_\tau l = \frac{4\pi}{c} (j_n S)$ примет вид $H 2\pi r = \frac{4\pi}{c} I$ или $H = \frac{I}{2\pi r}$. Величина поля (H) прямолинейного тока пропорциональна силе тока в проводнике и обратно пропорциональна расстоянию до точки, в которой поле определяем.

Магнитное поле токовой плоскости. Проведем вспомогательный контур l , который лежит в плоскости, перпендикулярной токовой плоскости (рис. 3.11). Магнитное поле по обе стороны токовой плоскости однородно, но направлено в противоположные стороны, т.е. оно антипараллельно. На основании второго уравнения поля силовые линии замыкаются на бесконечности. Третье уравнение поля для токовой плоскости записывается:

$H2l_1 = \frac{4\pi}{c} i l$, где $i = \frac{J}{2\pi r}$ — полный ток через контур; $\vec{H}_\tau l = Hl_1 + 0 \cdot l_2 + Hl_1 + 0 \cdot 2l_2 = H2l_1$.

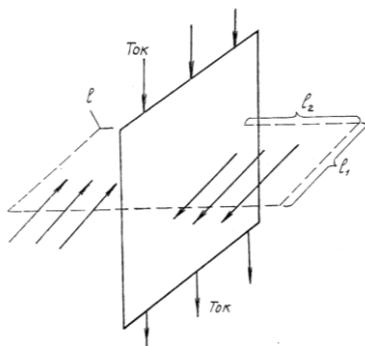


Рис. 3.11

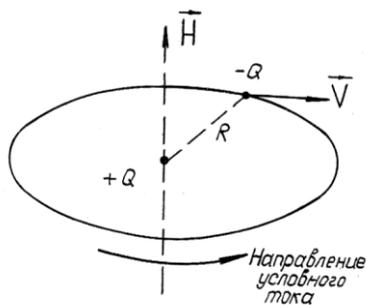


Рис. 3.12

Напряженность магнитного поля токовой плоскости

$$H = \frac{2\pi}{c} i = \frac{2\pi J}{cl} \quad (3.18)$$

зависит от силы тока через плоскость, а также от расстояния до точки от плоскости, в которой определяется поле.

Магнитное поле в центре кругового тока. Если имеется проводник в форме окружности, то электрическому току в нем соответствует вращающийся по окружности электрический заряд (рис. 3.12). Для расчета напряженности магнитного поля применим с оговорками формулу $H = \frac{J}{2\pi r}$ для бесконечного прямолинейного проводника с током. Будем считать, что концы его мы замкнули. Выпустим коэффициенты в формуле $H = \frac{J}{2\pi r}$ и проведем приближенные расчеты. Тогда H в центре кругового проводника равен $H \approx \frac{J}{r}$. Из формулы видно, что напряженность магнитного поля в центре кругового тока прямо пропорциональна силе тока и уменьшается с ростом r . Все эти характеристики магнит-

ного поля для проводников разной конфигурации можно вычислить, исходя из закона Био–Савара–Лапласа. Этот закон в обобщенном виде входит в третье уравнение Максвелла.

Поля движущихся зарядов. Рассмотрим влияние движущихся зарядов на характер поля, создаваемого ими. Мы знаем, что электрическое поле покоящегося точечного заряда – Кулоновское. Какой характер будет иметь поле в случае движения электрического заряда с постоянной скоростью? Такое поле имеет две составляющие электрического и магнитного полей. Они не связаны друг с другом, их можно изучать отдельно, анализируя три первых уравнения Максвелла для случая постоянного во времени поля.

Электрическое поле движущихся с постоянной скоростью зарядов называют стационарным, как и электростатическое поле, оно потенциальное. Если заряды движутся с постоянной скоростью, то их пространственно-временное распределение зарядов не меняется с течением времени, поэтому их можно сравнивать с неподвижными зарядами. В случае их движения с постоянной скоростью электрические заряды как бы обмениваются местами, но их концентрация остается постоянной. Исходя их проведенных рассуждений, можно сказать, что на заряды, движущиеся с постоянной скоростью, действует так же, как и на покоящиеся, Кулоновская сила. Направленное движение заряженных частиц с постоянной скоростью обеспечивают внешние силы (сторонние). Значит, силовой характеристикой стационарного поля является вектор напряженности \vec{E} . Он равен сумме двух векторов $\vec{E} = \vec{E}_{\text{кул}} + \vec{E}_{\text{ст}}$, где $\vec{E}_{\text{кул}}$ – вектор напряженности поля Кулоновских сил, $\vec{E}_{\text{ст}}$ – вектор напряженности поля сторонних сил.

Со стороны магнитного поля на электрический заряд действует сила $\vec{F}_л = q[\vec{v} \times \vec{B}]$ или $F = qvB \sin \alpha$, где v – скорость движения заряженной частицы; угол α – это угол между направлением поля \vec{B} и скоростью частицы \vec{v} . На совокупность зарядов,

движущихся с постоянной скоростью вдоль проводника с током, со стороны магнитного поля действует сила Ампера $F_A = JBl \sin \alpha$, где l – длина проводника, α – угол между направлением силы тока (J) и вектором магнитной индукции (\vec{B}). В заключение можно сказать, что со стороны электрического и магнитного поля на движущиеся заряженные частицы действует сила $\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v} \times \vec{B}]$, получившая название силы Лоренца.

ВИХРЕВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ. ЧЕТВЕРТОЕ УРАВНЕНИЕ МАКСВЕЛЛА. Дж. Кл. Максвелл, досконально изучив работы М. Фарадея о явлении электромагнитной индукции, делает вывод: причина появления в замкнутом контуре индукционного тока связана с возникновением вихревого электрического поля. Изменяющееся во времени магнитное поле порождает вихревое электрическое. Этим прежде всего это поле и отличается от электростатического и стационарного, последние вызваны электрическими зарядами. Вихревое электрическое поле так же, как и электростатическое и стационарное – силовое. Под действием этого поля электрические заряды в проводнике приходят в направленное движение, вызывая в нем индукционный ток. Силовой характеристикой этого поля является вектор напряженности \vec{E} , а энергетической – ЭДС индукции (E_i).

Напряженность вихревого электрического поля, как показали измерения и расчеты, $E_{\text{вих}} \sim \frac{1}{r}$. Между тем мы знаем, что напряженность электростатического поля $E_{\text{кул}} \sim \frac{1}{r^2}$. Подобный характер зависимости напряженности электрического поля от расстояния позволяет обнаружить его в пространстве гораздо дальше от источника возбуждения, чем электростатическое и стационарное.

В отличие от электростатического и стационарного полей вихревое поле не является потенциальным. Линии напряженно-

сти этого поля замкнутые. Они охватывают изменяющийся магнитный поток подобно тому, как силовые линии магнитного поля охватывают проводник с током. Обобщая идеи М. Фарадея, Максвелл формулирует уравнение: циркуляция напряженности \vec{E}_r электрического поля по контуру l прямо пропорциональна изменению потока напряженности \vec{H}_n магнитного поля сквозь поверхность S , опирающуюся на контур l :

$$\vec{E}_r l = - \frac{\Delta}{\Delta t} (H_n S). \quad (3.19)$$

Это уравнение связывает скорость изменения магнитного потока через любую поверхность и циркуляцию вектора напряженности.

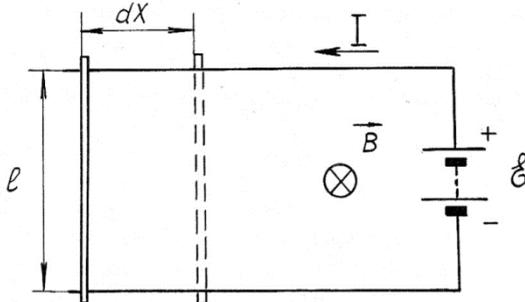


Рис. 3.13

Рассмотрим пример. Контур прямоугольной формы расположен в магнитном поле индукции \vec{B} , имеет подвижную часть длиной l (рис. 3.13). Источник ЭДС (ε) создает в контуре с сопротивлением R силу тока I . На проводник со стороны магнитного поля действует сила Ампера, она и перемещает проводник на расстояние dx за время dt . Работа, совершаемая источником тока, равна энергии, идущей на нагревание проводника. Согласно закону Джоуля–Ленца она равна $I^2 R dt$ и на перемещение проводника под действием силы Ампера ($F dx$). Полная работа электри-

ческого тока в цепи равна $\varepsilon I dt = I^2 R dt + F dx$. Для нашего случая $F = IBl \sin \alpha$; $\sin \alpha = 1$ (т.к. $B \perp I$). Промежуток времени dt очень маленький, поэтому силу тока можно считать постоянной. Сократив выражение $\varepsilon I dt = I^2 R dt + IBl dx$ на I , получим $\varepsilon dt = IR dt + B l dx$; $B l dx = B ds = d\Phi$, тогда $\varepsilon dt = IR dt + d\Phi$. Выразим силу тока из последнего выражения $I = \frac{\varepsilon - \frac{d\Phi}{dt}}{R}$. В числителе стоит алгебраическая сумма электродвижущих сил, имеющих в контуре: ЭДС источника и ЭДС электромагнитной индукции, которая возникает в результате меняющегося магнитного потока, пронизывающего контур, равного $\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}$. Все соотношение $I = \frac{\varepsilon + \varepsilon_i}{R}$ является математическим выражением закона Ома для полной цепи; формула $\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}$ является математическим выражением закона электромагнитной индукции. Запишем выражение индукционного тока: $I = \frac{\varepsilon_i}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}$. Из формулы видно, что ток зависит от сопротивления. Если контур из идеального изолятора, то тока в цепи не будет. Если в однородном магнитном поле с индукцией B вращается рамка площадью S , то магнитный поток, пронизывающий рамку, равен $\Phi = BS \cos \omega t$, тогда

$$BS\omega = \varepsilon_m; \quad \frac{\varepsilon_m}{R} = I_m; \quad I = I_m \sin \omega t.$$

Из полученной формулы видно, что в рамке, вращающейся в магнитном поле, возникает переменный синусоидальный индукционный ток. Какой электрический заряд перемещается по замкнутому контуру в результате электромагнитной индукции?

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{или} \quad dq = -\frac{d\Phi}{R} \quad (3.20)$$

Интегрируя последнее выражение, получим:

$$\int_0^q dq = -\frac{1}{R} \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} d\Phi; \quad q = -\frac{1}{R} (\Phi_2 - \Phi_1); \quad q = -\frac{\Delta\Phi}{R}. \quad (3.21)$$

Заряд, протекающий по проводнику, зависит от изменения магнитного потока, пронизывающего этот контур и его сопротивления. Эта зависимость индуцированного заряда от $\Delta\Phi$ и R используется для измерения переменного магнитного потока приборами, регистрирующими электрический заряд.

Вихревой характер индукционного электрического поля доказывается образованием вихревых потоков в массивных проводниках и их нагреванием; торможением маятников вихревыми токами; плавлением воска на дисках, помещенных в переменное магнитное поле, и т. д.

Связь переменного электрического поля с вихревым магнитным. Третье уравнение Максвелла. Электромагнитные колебания и волны. Обобщая опыты Эрстеда, Ампера и Фарадея, Максвелл приходит к выводу о том, что всякое переменное электрическое поле порождает вихревое магнитное. Скорость изменения электрического поля Максвелл назвал током смещения. Он, подобно обычному току, вызывает магнитное поле. Как было показано, $j_{см} = \frac{d\vec{D}}{dt}$ или $j_{см} = \epsilon\epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}$. Тогда третье уравнение поля в окончательном виде можно записать:

$$\vec{H}_\tau l = j_{см} S + \frac{\Delta}{\Delta t} E_n S. \quad (3.22)$$

Это уравнение отражает тот факт, что вихревое магнитное поле порождается как токами проводимости (движущимися электрическими зарядами), так и током смещения (переменным электрическим полем).

Совокупность меняющихся электрических и магнитных полей и представляет электромагнитное поле. Возникновение в пространстве какого-либо переменного поля (электрического и магнитного) вызывает цепь взаимных превращений. Согласно третьему уравнению меняющееся во времени электрическое поле приводит к появлению вихревого магнитного поля. Аналогично четвертому оно возникает в тех точках пространства, где имеется

меняющееся во времени магнитное поле. Это иллюстрируют приведенные рисунки (рис. 3.14). Процесс распространения единого электромагнитного поля в пространстве получил название электромагнитной волны (рис. 3.15). Она состоит из взаимосвязанных, одновременно изменяющихся электрического и магнитного полей, с напряженностями \vec{E} и \vec{H} . Изменение этих векторов во времени в каждой точке электромагнитного поля происходит по гармоническому закону. Электрический и магнитный векторы напряженности волны и скорость ее распространения лежат в плоскостях взаимоперпендикулярных. Гармонические колебания векторов происходят в одной фазе. Числовые выражения векторов напряженности электрического и магнитного полей связаны соотношением: $\sqrt{\epsilon\epsilon_0}\vec{E} = \sqrt{\mu\mu_0}\vec{H}$.

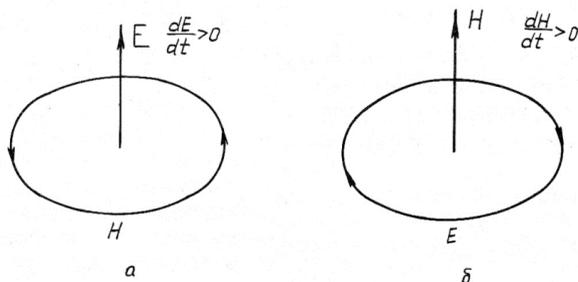


Рис. 3.14

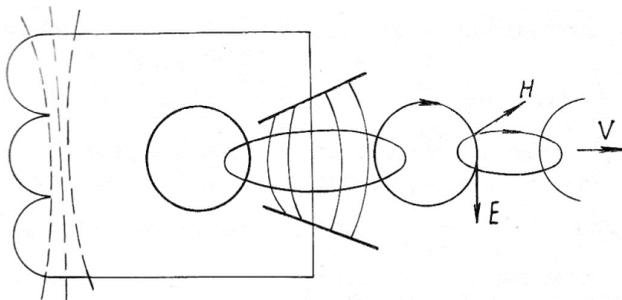


Рис. 3.15

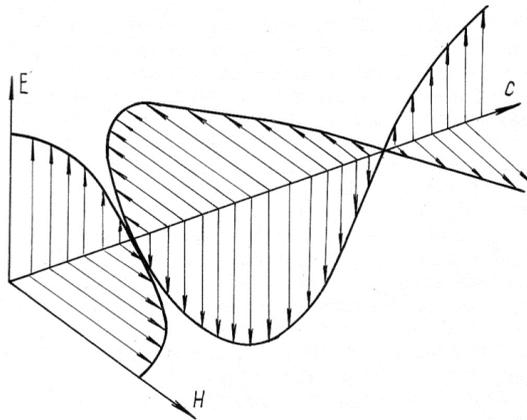


Рис. 3.16

Максвелл показал, что скорость распространения электромагнитных волн зависит от электрических и магнитных свойств среды и определяется формулой $v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon \mu}}$; для вакуума $\varepsilon=1$, $\mu=1$, тогда $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8$ м/с. Таким образом, скорость распространения электромагнитных волн в вакууме совпадает со скоростью света. В среде скорость распространения электромагнитных волн $v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}$, т.е. она меньше, чем в вакууме. Впервые электромагнитные волны в лабораторных условиях получил в 1888 году Г.Р. Герц (1857–1894) с помощью вибратора (колебательный контур). Герц экспериментально обосновал поперечность электромагнитной волны. Используя в качестве приемника почти замкнутый проводящий контур с узким зазором между концами проводника, Герц обнаружил, что вектор напряженности магнитного поля меняется в плоскости, перпендикулярной электрическим колебаниям. Рассчитав ее скорость, получил результаты, хорошо согласующиеся с теоретическими расчетами

Д.К. Максвелла. Экспериментальные исследования Г. Герца подтвердили теорию электромагнитного поля, разработанную Д.К. Максвеллом.

Выводы. Теория электромагнитного поля Дж. Кл. Максвелла – величайший вклад в развитие классической физики. Она позволила с общих позиций охватить огромный круг явлений от электростатического поля до световых явлений. Эта теория относится к числу феноменологических. Она не раскрывает внутреннего механизма явлений, связанных с появлением электрических и магнитных полей. Максвелл оперирует тремя физическими величинами, определяющими свойства среды: ϵ , μ , σ . Однако он не рассматривает зависимости этих величин от свойств среды.

Теория Максвелла является макроскопической. В ней исследуются свойства поля, созданного макроскопическими зарядами и токами. Такие заряды сосредоточены в объемах, много больших по сравнению с размерами (объемами) атомов и молекул. Кроме этого, различные применения полей наблюдаются в точках, расположенных от источников на расстоянии гораздо больших размеров атомов и молекул. Известно, что реально существуют микроскопические заряды и токи, их совокупность и дает макроскопические заряды и токи. Каждый микрочаряд или микроток создает свое микрополе в данной точке. Эти поля на основе принципа суперпозиции можно складывать. Теория Максвелла изучает усредненные электрические и магнитные поля. Теория Максвелла охватила огромный круг экспериментальных фактов, но не смогла объяснить тех явлений, в которых проявляется внутреннее строение вещества. Электронная теория вещества, созданная Х.А. Лоренцем, явилась дальнейшим развитием теории электромагнитного поля Д.К. Максвелла.

ОБОБЩЕНИЯ И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ В ТАБЛИЦАХ, СХЕМАХ И РИСУНКАХ

Таблица 9

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Основание		
Факты	Идеализированный объект	Понятия, физические величины
Опыты и законы: Г. Эрстеда, В. Вебера, М. Кулона, А. Ампера, М.В. Остроградского и К.Ф. Гаусса, Ж.Б. Био, Ж. Савара и П.С. Лапласа, М. Фарадея и др.	Непрерывное электромагнитное поле	1. Электрическое стационарное поле 2. Магнитное поле 3. Вихревое поле электрическое и магнитное 4. Напряженность электрического и магнитного полей (\vec{E} , \vec{H}) 5. Индукция электрического и магнитного полей (\vec{D} , \vec{B}) 6. Относительная электрическая и магнитная проницаемость среды (ϵ , μ) 7. Поток индукции электрического и магнитного полей (N , Φ)
Ядро		
Принципы	Уравнения Максвелла	
1. Близкодействия 2. Суперпозиции	1. Электрические заряды создают электрическое поле, линии напряженности которого начинаются и оканчиваются на зарядах или уходят в бесконечность 2. Магнитных зарядов в природе не существует. Магнитные линии – замкнутые 3. Переменное магнитное поле создается как токами проводимости, так и током смещения (переменным электрическим полем) 4. Вихревое электрическое поле создается переменным магнитным, линии индукции которого замкнуты и охватывают линии напряженности электрического поля	

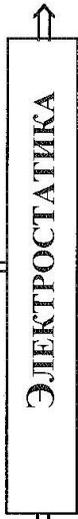
Следствие	
Математические выражения	Применение теории к описанию полей
$\operatorname{div} \vec{D} = \rho$ $\operatorname{div} \vec{B} = 0$ $\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ $\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	<ol style="list-style-type: none"> 1. Поле покоящегося точечного заряда 2. Электрическое поле зарядов, распределенных по сфере, линии, плоскости 3. Энергия поля, разность потенциалов 4. Электрическое поле диполя 5. Магнитное поле прямолинейного тока 6. Магнитное поле токовой плоскости 7. Магнитное поле в центре кругового тока 8. Поле движущихся зарядов 9. Вихревое электрическое поле

Проводники в электрическом поле.
 Диэлектрики в электрическом поле.
 Механизм поляризации диэлектриков.
 * Электреты и пьезоэлектрики.
 Пьезоэлектрический эффект.
 Электрическое поле зарядов, распределенных по сфере, линиям, плоской поверхности.

↑ Ч Т О И З В И Э ↑
 ↑ Ч Т О И З В И Э ↑

Электрическое поле покоящегося точечного заряда.
 Электроемкость, конденсаторы.
 Энергия электрического поля.
 Объемная плотность энергии электрического поля.

Модель материального объекта: электрическое поле



↑ ↑
 ↑ ↑
 ?

↑ ↑
 ↑ ↑
 ?

↑ ↑
 ↑ ↑
 ?

С Р Е Д С Т В А О П И С А Н И Я

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ:

электрический заряд, электрическое поле (однородное, неоднородное), напряженность, силовая линия электрического поля, разность потенциалов, потенциал поля точечного заряда, потенциал данной точки поля, работа электрического поля.

* электрическая индукция, электрическая постоянная, относительная электрическая проницаемость.

$$\sum_{i=1}^n q_i = const; \vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2}; k = \frac{K_0}{\epsilon}; K_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}; \epsilon = \frac{D}{E};$$

$$\vec{E}_0; \vec{E} = k \frac{q}{r^2}; E = \frac{2\rho}{r}; E = \frac{D}{\epsilon_0};$$

$$c = \frac{q}{\Delta\varphi}; \epsilon_{00}^{\Delta}; c_{-in} = 4\pi\epsilon_0 R; c_{-0n} = c_1 + c_2; \dots; \frac{1}{c_{0n}} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2}; \dots;$$

$$W_s = \frac{c\varphi^2}{2} = \frac{q\mu}{2} = \frac{q^2}{2c}$$

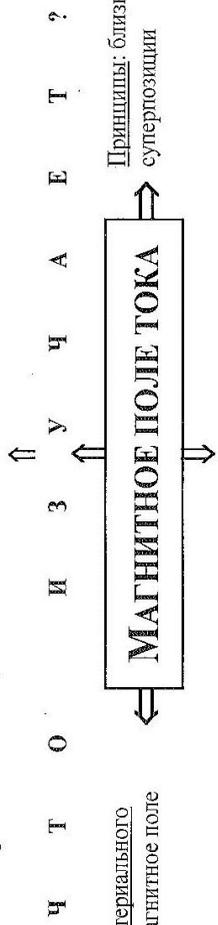
$$\Delta A = F \Delta r = k \frac{qq_0}{r^2} \Delta r; A = \int_{r_1}^{r_2} F dr = \int_{r_1}^{r_2} k \frac{qq_0}{r^2} dr = eqq_0 \int_{r_1}^{r_2} r^{-2} dr = -(\kappa \frac{qq_0}{r_2} - \kappa \frac{qq_0}{r_1})$$

ЗАКОНЫ И УРАВНЕНИЯ

Рис. 3.17. Обобщающая схема по теме «Электростатика» раздела «Электродинамика»

магнитное поле прямолинейного проводника, кругового тока, катушки с током. Магнитное поле Земли, Солнца и планет. Магнитные свойства вещества. Магнитная запись информации. Магнитное поле движущихся зарядов ($V = const$).

Опыт: Эрстеда, Араго, Ампера. Принцип действия электроизмерительных приборов. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. Радиационные пояса Земли, полярные сияния. Ускорители заряженных частиц.



Модель материального объекта: магнитное поле

Принципы: близкоедействие, суперпозиции

С Р Е Д С Т В А О П И С А Н И Я
 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ: ЗАКОНЫ И УРАВНЕНИЯ

магнитное поле тока, индукция и напряженность магнитного поля, поток вектора магнитной индукции, силы Ампера, Лоренца, силовая линия магнитного поля, относительная магнитная проницаемость среды, магнитная постоянная.

$$\vec{F}_A = \vec{B} I \sin \alpha; \vec{F}_L = \vec{B} I q \sin \alpha = [\vec{B}; \vec{v}] \quad \alpha = [\vec{B}; \vec{v}]; \vec{B} = \frac{\vec{F}_A}{I l \sin \alpha};$$

$$\vec{\Phi} = \vec{B} S \cos \alpha \quad \alpha = [\vec{B}; \vec{n}]; \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}; H = \frac{I}{2\pi r}; H = \frac{2I}{c}$$

$$\text{rot} \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}_{\text{ток}}$$

Рис. 3.18. Обобщающая схема по теме «Магнитное поле тока» раздела «Электродинамика»

Опыт по самоиндукции. Явление самоиндукции. Способы получения переменного магнитного поля. Индуктивность. Влияние среды на индуктивность. Объем и плотность энергии электрического поля. Явление электромагнитной индукции.

Ч Т О И З У Ч А Е Т ?

Модель материального объекта:
 вихревое магнитное поле, \leftarrow
 вихревое электромагнитное поле, электромагнитное поле

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Принципы: близкодействие, суперпозиции

С Р Е Д С Т В А О П И С А Н И Я

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ:

переменное магнитное поле, вихревое электрическое поле, электромагнитное поле, электромагнитная индукция и поток электромагнитной индукции, индукционный ток, ЭДС индукции, самоиндукция, индуктивность, объемная плотность энергии электрического поля

ЗАКОНЫ И УРАВНЕНИЯ

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}; \Delta\Phi = \Delta BS \cos\alpha; \Delta\Phi = B\Delta S \cos\alpha; \Delta\Phi = BS\Delta \cos\alpha;$$

$$\Delta\Phi \sim \Delta I; \Delta\Phi = L\Delta I; \mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}; L = \mu_0 \mu r_0^2 \frac{N^2 V}{\Delta l}; \mathcal{E} = B l v \sin\alpha;$$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{1}{R} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{1}{R} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}; \Delta I = -\frac{\Delta\Phi}{R}; W = \frac{LI^2}{2}; W = \frac{B^2 V}{2\mu_0 \mu};$$

$$\omega = \frac{W}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu}; \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Рис. 3.19. Обобщающая схема по теме «Электромагнитная индукция» раздела «Электродинамика»

Свободные электромагнитные колебания в колебательном контуре. ⇐ Колебательное движение →
 Превращение энергии в колебательном контуре. и колебательные системы

Ч Т О И З У Ч А Е Т ?
 ↑
 ↑

Модель материального объекта: переменное электрическое и магнитное поля

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Принцип: суперпозиции. Аналогия электромагнитных и механических колебаний

С Р Е Д С Т В А О Ш И С А Н И Я

⇓
 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ:

колебательное движение, колебательные системы, электромагнитные колебания (свободные, вынужденные), гармонические колебания, период, амплитуда, частота, смещение, скорость, ускорение, энергия электромагнитных колебаний, колебательный контур, сложение гармонических колебаний.

⇓
 ЗАКОНЫ И УРАВНЕНИЯ

$$u = U_m \sin \omega t; i = I_m \cos \omega t$$

$$W_k = \frac{CU^2}{2} \iff W_k = \frac{LI^2}{2}$$

$$\vec{E} \perp \vec{B} \perp \vec{V} \quad \vec{V} = \sqrt{6}u$$

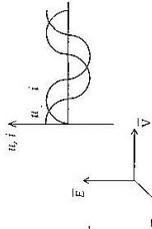
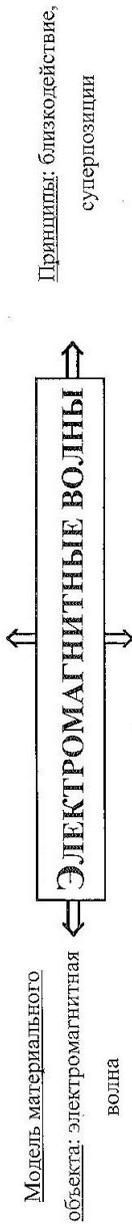
$$T = 2\pi\sqrt{LC}; T = \frac{1}{f}; \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}; \epsilon = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}; L \frac{\Delta I}{\Delta t} \leq u.$$


Рис. 3.20. Обобщающая схема по теме «Электромагнитные колебания» раздела «Электродинамика»

Физические основы радиотехники.
Изобретение радио А.С. Поповым.
Принципы радиосвязи.
Распространение радиоволн. Влияние
ионосферы Земли. Радиолокация.
Телевидение. Развитие средств связи.

Получение электромагнитных волн
(М. Фарадей → Д.К. Максвелл →
Г. Герц → А.С. Попов). Энергия
электромагнитной волны. Плотность
потока излучения.

Ч Т О И З У Ч А Е Т ?



Принципы: близкоедействие,
суперпозиции

С Р Е Д С Т В А О П И С А Н И Я

↓ ↓
ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ: ЗАКОНЫ И УРАВНЕНИЯ

электромагнитное поле, электромагнитные волны, энергия
электромагнитной волны, модуляция, демодуляция,
детектирование, плотность потока излучения, радиосвязь,
радиоволны.

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}; n = \frac{c}{V} = \sqrt{\epsilon\mu}; p = \frac{W}{c}; p = mc; W = mc^2;$$

$$m = \frac{W}{c^2}; \omega = \frac{1}{2}(\epsilon\epsilon_0 E^2 + \frac{B^2}{\mu_0\mu}); \lambda = cT = \frac{c}{\nu}.$$

Рис. 3.21. Обобщающая схема темы «Электромагнитные волны» раздела «Электродинамика»

**Классификация исторических опытов,
составляющих базис теории электромагнитного поля**

Теоретическое основание	Экспериментальный факт
ОСНОВАНИЕ	
Противоречие между теориями дальнего действия (Ш. Кулон, А. Ампер, Э. Био, П. Лаплас) и ближнего действия (М. Фарадей) 60-е гг. XIX в. Исследование природы электромагнитного взаимодействия	Г. Эрстед – открытие влияния проводника с током на ориентацию магнитной стрелки (1820) М. Фарадей – открытие явления электромагнитной индукции (1834) О. Рёмер – измерение скорости света в вакууме (1676)
ЯДРО	
4 уравнения Максвелла (1855–1856) $\operatorname{div} \vec{D} = 4\pi\rho$ $\operatorname{div} \vec{B} = 0$ $\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ $\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	Ш. Кулон – установление закона взаимодействия зарядов (1875) Д. Араго – обнаружение намагничивания железных опилок вблизи проводника с током (1820) М. Фарадей – экспериментальное установление закона электромагнитной индукции (1835) Э. Ленц – установление закона о направлении индукционного тока – правило Ленца (1833) А. Ампер – установление закона взаимодействия электрических токов (1820)
СЛЕДСТВИЕ	
Накопившиеся экспериментальные факты, которые объяснялись с точки зрения различных гипотез (флюидов, жидкостей и др.), и нашедшие единообразное объяснение уравнениями Максвелла	Птолемей – установление закона отражения света (II в. н.э.) В. Снеллиус – установление законов отражения и преломления света (1621) И. Ньютон – наблюдение интерференционных колец и дисперсионного спектра (1666) Г. Гюйгенс – открытие явления поляризации света (1678)

Теоретическое основание	Экспериментальный факт
СЛЕДСТВИЕ (продолжение)	
Опыты, иллюстрирующие частные явления и закономерности, объясняемые уравнениями Максвелла, а также получившие широкое применение в технике	Т. Юнг – открытие явления интерференции света (1801) О. Френель – открытие явления дифракции света на круглом отверстии (1816) А. Йедлик – изобретение электродвигателя (1827–1828) П.Н. Яблочков – изобретение телефона (1876) Г. Маркони, А.С. Попов – изобретение радиосвязи (1896)
<i>Опыты по открытию явлений и закономерностей, предсказанных на основе уравнений Максвелла</i>	
Д.К. Максвелл – существование электромагнитных волн, волновая природа света	Г. Герц – открытие электромагнитных волн (1888) П.Н. Лебедев – открытие давления света (1899)

Задачи и упражнения

3.1. Два заряженных шарика, подвешенных на нитях одинаковой длины, опускают в керосин. Какова должна быть плотность материала шаров, чтобы угол расхождения нитей в воздухе и керосине был один и тот же? Диэлектрическая проницаемость керосина $\varepsilon = 2$, плотность керосина $\rho = 0,8 \cdot 10^{13}$ кг/м³.

3.2. Металлическое кольцо радиусом R имеет заряд q . Чему равны напряженность поля и потенциал: а) в центре кольца; б) на расстоянии a от центра вдоль оси, перпендикулярной к плоскости кольца?

3.3. Определить величину поверхностной плотности электрического заряда Земли и силу, действующую на 1 м² земной поверхности в том месте, где напряженность электростатического поля Земли численно равна 200 В/м.

3.4. Электрон влетает параллельно пластинам в плоский конденсатор, поле в котором $E = 60$ В/см. Найти изменение модуля скорости электрона к моменту вылета его из конденсатора, если начальная скорость $v_0 = 2 \cdot 10^7$ м/с, а длина конденсатора $l = 6$ см.

3.5. Вычислите напряженность поля двух равных по величине и противоположных по знаку зарядов, расположенных на расстоянии r друг от друга на оси в точке $r \gg l$.

3.6. Перед вами два одинаковых по виду стержня, один из них намагничен, а другой нет. Как узнать, какой из них намагничен, не прибегая к помощи других стержней и магнитов? Можно ли это сделать, не используя магнитного поля Земли?

3.7. Электрон движется точно по оси замкнутого контура с током. Каково его движение? Что произойдет, если вектор скорости электрона будет составлять небольшой угол с осью контура?

3.8. Электрон движется на восток вблизи экватора. Как направлена сила, действующая на электрон со стороны магнитного поля Земли?

3.9. Магнитный стержень падает сквозь горизонтальный проволочный виток северным концом вниз. Опишите поведение тока в витке. Используя правило Ленца, выясните, замедлится или ускорится падение стержня при прохождении им витка.

3.10. Однородное магнитное поле с индукцией B перпендикулярно к плоскости медного кольца ($\rho = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$), имеющего диаметр $D = 20 \text{ см}$ и толщину $d = 2 \text{ мм}$. С какой скоростью должна изменяться во времени магнитная индукция B , чтобы индукционный ток в кольце равнялся 10 А ?

3.11. Контур состоит из катушки индуктивностью $L = 28 \text{ мкГ}$, сопротивления $R = 1 \text{ Ом}$ и конденсатор емкостью $C = 2222 \text{ пФ}$. Какую мощность должен потреблять контур, чтобы в нем существовали незатухающие колебания, при которых максимальное напряжение на конденсаторе $U_0 = 5 \text{ В}$?

ЧАСТЬ IV. ОСНОВЫ КЛАССИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕОРИИ ВЕЩЕСТВА

Экспериментальные основы классической электронной теории вещества. Электронная теория изучает физико-химические свойства веществ на основе движения и взаимодействия заряженных частиц (электронов, ионов). Макроскопические свойства тел можно глубоко понять и оценить, изучив прежде всего свойства электронов, их движение и взаимодействие. Начало истории электрона соотносят с изучением электричества. Слово «электричество» произошло от греческого «янтарь», его появление связывают с именем Фалеса Милетского (650–550 гг. до н.э., Греция). Более тысячи лет под электричеством понимали лишь способность натертых (наэлектризованных) тел притягивать к себе другие тела. Первые экспериментальные исследования в области электричества были начаты английским врачом В. Гильбертом (1540–1603). Позже, в 1670 году, немецкий физик О. Герике (1602–1686) изобретает электростатический генератор. Он показывает, что электрические силы полярны (наряду с притяжением существует отталкивание). Им открыта электрическая искра. В начале XVII века Стефан Грей проводит эксперимент, связанный с передачей электрических действий на расстояние. С балкона дома он опускает шарик на металлической проволоке, один конец которой соединен с наэлектризованным телом. Эксперимент показал, что шарик оказался заряженным, он приобрел свойство притягивать к себе другие незаряженные легкие тела. Грей заменил металлический проводник нитями из шелка, смолы, стекла и увидел, что шар утратил способность притягивать и отталкивать. Это первые опыты, позволившие разделить все вещества на проводники и диэлектрики. В 1745 году голландский ученый П. Мушенбрук (1692–1761) осуществил опыт, послуживший началом конденсирования электричества. Раз существуют изоляторы, то можно на них накопить

электричество, окружив его изолирующей средой. Гвоздь, соединенный с генератором, он опустил в бутылку с водой, вода наэлектризовалась. Электрический удар в результате осуществленного лейденского опыта был огромен.

Первые эксперименты показали, что электричество можно накапливать, «перекачивать» с одного тела на другое, значит, оно является материальным. Американский писатель, наблюдатель природы и экспериментатор Б. Франклин (1706–1790), делает теоретическое обобщение об электричестве. Он впервые оперирует хорошо известными нам терминами: положительный и отрицательный заряд, конденсатор, батарея. Им высказана гипотеза о существовании электрического флюида. Согласно этой гипотезе, электрическое состояние возникает тогда, когда флюид больше или меньше нормального. Недостаток электрического флюида вызывает отрицательную электризацию, избыток – положительную. Если флюид свободно перемещается в теле, то это будет проводник, плохо – изолятор. Электрический флюид Франклина имеет атомистическую природу. Франклин и другие исследователи считали, что флюид – особый вид материи, он невесомый, подвижный, может как притягиваться, так и отталкиваться. Правда, ничего общего не имеет с весомой материей – веществом. Несмотря на это, электрические частички Франклина и начинают историю электрона.

В XVIII веке все физические явления, в том числе электрические, пытались свести к механическим взаимодействиям частиц. Законы Ньютона были уже известны, начались поиски аналогичного закона взаимодействия электрических частиц. Немецкий ученый Ф. Эпинус (1724–1802), большую часть своей жизни проживший в России, высказывает предположение, что сила взаимодействия частичек электрического флюида, подобно гравитационной, убывает пропорционально квадрату расстояния. Высказанное предположение, предчувствие закона удалось теоретически и математически обосновать Ш.О. Кулону (1736–1806).

Эксперименты с крутильными весами позволили установить важнейший закон природы ($F \sim \frac{q_1 q_2}{r^2}$). Здесь q_1 и q_2 – количество электрического флюида в одном и во втором теле, или просто «количество электричества». Примечательно то, что дальнейшие исследования шли по пути изучения законов взаимодействия заряженных тел. Природу же этого взаимодействия не раскрывали.

В начале XIX века, благодаря развитию химии, точнее химического действия электрического тока, появилась гипотеза о связи электрического флюида с веществом. В 1806 году Дэви высказывает предположение, что химические и электрические силы имеют общую природу. Ток – движение электрического флюида, он вызывает химические реакции, а они – электрический ток. В 1800 году в Италии А. Вольта (1745–1827) изобретает первый источник тока – вольтов столб. С помощью его осуществлены реакции разложения воды, электролиз солей и щелочей. М. Фарадей показывает, что электрический ток, протекая через растворы одновалентных веществ, выделяет на электродах количество вещества, пропорциональное их атомным весам. Эти опыты впоследствии послужили основанием для важных выводов о связи количества электричества с атомом каждого вещества. Фарадей, исследуя электрохимическое разложение веществ, представляет атом как частицу вещества, имеющую электрические полюса, – ионы. Ионы, выделяющиеся на аноде, он назвал анионами, у катода – катионами. Числа, соответствующие их весовым количествам, в которых они выделяются, названы электрохимическими эквивалентами ($k = \frac{m}{q}$). М. Фарадей плодотворно развивает идеи шведского химика Берцелиуса об электрически заряженном атоме. По его мнению, атомы всех веществ имеют полюсы, потому что заряжены положительным или отрицательным электричеством.

Фарадей устанавливает, что электрохимические эквиваленты пропорциональны их химическим эквивалентам ($K \sim X$).

Эти эксперименты послужили основанием для важных теоретических выводов. Носителем электрических сил является не электрический флюид (жидкость), а частицы материи – атомы. Фарадей определяет количество электричества, которое выделяет грамм-эквивалент любого вещества, позже это число будет названо его именем ($K = \frac{1}{F} X$). На основании экспериментальных исследований, осуществленных М. Фарадеем, сделан важный вывод: отношение полного количества электричества, прошедшего через раствор, к массе выделившегося вещества на электроде должно быть равно отношению заряда иона к его массе. Спустя полвека исследования по измерению отношения заряда к массе приведут к открытию электрона: ($\frac{q}{M} = \frac{q_e}{m}$), q – прошедший через электролит заряд; M – количество вещества, которое отложилось на электроде; m – масса одновалентного иона; q_e – заряд одновалентного иона, равный по величине заряду электрона. Полученное значение q_e дало возможность определить значение фундаментальной константы (число Авогадро). Если масса выделившегося вещества на электроде равна одному грамм-эквиваленту, то $q = F = N_A q_e$, тогда $N_A = \frac{F}{q_e}$.

Понятие иона, в неявном виде проявившееся у Фарадея, приобрело определенный смысл в теории электролитической диссоциации шведского ученого С. Аррениуса (1859–1927), лауреата Нобелевской премии. Согласно этой теории частицы в растворе приобретают электрические заряды. Атомы в молекуле имеют электричество противоположного знака. При диссоциации атомы превращаются в заряженные ионы. В целом молекула нейтральна. Ионы, входящие в ее состав, связаны электрическими силами, поэтому разделить их диффузией нельзя.

Гипотеза Аррениуса появилась в 1887 году, ей предшествовали важные экспериментальные и теоретические факты, внесшие определенный вклад в развитие электронной теории вещества. Остановимся на некоторых из них.

Как показал Г.Х. Эрстед (1820), вокруг проводника с током возникает магнитное поле. Электричество и магнетизм взаимосвязаны. А. Ампер (1775–1836) строит учение о взаимодействии электрических токов. Экспериментально устанавливает, что сила взаимодействия, подобно закону Кулона, убывает обратно пропорционально квадрату расстояния между элементами тока (закон Ампера). Ампер делает исключительно важный вывод. В молекулах вещества циркулируют электрические токи, они взаимодействуют. Все магнитные явления можно свести к взаимодействию этих токов. По его мнению, опираясь на закон взаимодействия элементов тока, можно объяснить все электрические и магнитные явления. М. Фарадей в начале своих исследований придерживался концепции Ампера. Но скоро выяснилось, что на распространение электрических и магнитных явлений большое влияние оказывает окружающая среда. По его мнению, вокруг наэлектризованных тел, магнитов и электрических токов существует материя в особом состоянии, он ее ошибочно представляет в виде реальных образований – силовых линий. Взаимодействие между проводниками с током, магнитами передается не мгновенно, как считает Ампер, и не по прямой линии, а через поле – среду, разделяющее их. Позже Д.К. Максвелл развивает идеи М. Фарадея. Электрические заряды он рассматривает как особые точки пространства, в которых начинаются или оканчиваются силовые линии поля. Максвелл вводит понятие электромагнитного поля, которое окружает намагниченные тела и электрические токи. Взаимодействия между ними осуществляются через поле, которое отождествлялось с эфиром, заполняющим все окружающее пространство. Кажется, в этой теории пока нет места электрону. Однако надо сказать, что Фарадей–Максвелловская теория связывает «частицы электричества» и вещество в систему и является крупной вехой в развитии электронной теории вещества.

Если Фарадей является родоначальником теории электромагнитного поля, то Вебер (1804–1890) сделал нечто подобное в

электронной теории, уточняя природу и структуру вещества. Развита им концепция явилась началом развития электронной теории. Высказав гипотезу о том, что электрический ток является результатом движения положительной и отрицательной жидкости, он на основе закона Ампера получает новую закономерность. Сила взаимодействия, согласно его расчетам, зависит не только от расстояния, но и от скорости и ускорения движущихся масс. Этот подход в гипотезе Вебера новый и правильный, но его представления о двух электрических флюидах уводили исследователей от идей взаимосвязи «электричества» и вещества. Вскоре немецкий математик Г. Риман (1826–1866) высказывает предположение, что в любом металлическом проводнике находится равное количество положительного и отрицательного электричества. Отрицательное неподвижно, оно связано с весомым атомом, а положительное электричество подвижно. В поздних работах Вебера эта идея связи электричества с веществом получает дальнейшее развитие и конкретизацию. Вебер высказывает интересную мысль: он считает, что связав «электрические молекулы» ($+e$ и $-e$) с весомой молекулой, можно предположить, что они не находятся в одной точке, а обращаются «вокруг друг друга». В этих словах гениальное предвидение действительного механизма движения электрических частиц в атоме. Более поздние исследования покажут, что отрицательный заряд связан с меньшей массой, чем положительный, что «электрические молекулы» – электроны – обращаются вокруг положительных – атомного ядра.

Несмотря на то, что все мысли Максвелла были связаны с полем, разработкой концептуальной идеи, он развивает и атомистическую теорию электролитической проводимости. Токи ионов, по его мнению, это и есть конвекционные токи электричества. Каждая молекула, если она не связана с другой, имеет положительный заряд у катионов и отрицательный у анионов. Это определенное количество электричества Максвелл называет «молекулярным зарядом», который не меняется и может служить

единицей электричества – «молекула электричества». Идея исключительно правильная, до теории Аррениуса рукой подать, но Максвелл этого движения не сделал. Автор электромагнитной теории света ни разу в работах не упоминает о связи световых волн с процессами, происходящими внутри вещества. Гипотеза эфира полностью поглощает все мысли гениального ученого.

Идею Д.К. Максвелла («молекула электричества») развивает ирландский физик Г.Д. Стоней (1826–1911). Он, разделив количество электричества, которое необходимо пропустить через раствор, чтобы выделить один грамм водорода, на число атомов в одном грамм-атоме водорода получил величину элементарного электрического заряда ($0,3 \cdot 10^{-10}$ СГСЭ – $0,09 \cdot 10^{-16}$ Кл). Этот заряд Стоней в 1891 году предложил назвать электроном. Заметим, что Стоней не связывал это понятие с элементарной материальной частицей. Он назвал этим словом, говоря современным языком, квант электрического заряда (наименьшую порцию заряда). Итак, электричество – это нечто такое, что можно делить на малые порции (электроны).

В истории развития электронной теории вещества, самого электрона важное место занимает изучение газовых разрядов (М. Фарадеем – 1838, Г. Гейслером – 1859; И. Гитторфом – 1869; наконец, В. Круксом – 1878–79). Последний предугадал электрон в катодных лучах. В вакуумных трубках (трубки Крукса) он наблюдал механическое, тепловое и люминесцирующее действие катодных лучей, их отклонение в магнитном поле. Эти опыты позволили сделать вывод о том, что катодные лучи ведут себя как электрические токи, они обладают электрическим зарядом.

Мнения ученых о природе газовой проводимости оказались противоречивыми. Гитторф считал, что природа газовой проводимости подобна закономерностям, имеющим место в металлах и электролитах (закон Ома был уже известен). Одни считали, что закономерности газовой проводимости связаны с кон-

векцией наэлектризованных молекул и частиц пыли. Другие считали, что ток в газах обусловлен движением (потоками) эфира. Определенную ясность в этот вопрос внес С. Аррениус, исследуя проводимость под действием ионизаторов. Коротковолновое излучение увеличивает проводимость газов. Опыты Герца (1888) убедительно показали, что ультрафиолетовое облучение усиливает искровой разряд. Впервые высказывается концепция о единстве природы электропроводности в металлах, электролитах и газах. Но окончательно этот вопрос будет решен лишь с открытием рентгеновских лучей.

Среди экспериментальных фактов, послуживших основанием для развития теории, необходимо назвать исследование эффекта Холла. Американский физик Э. Холл (1811–1890) обнаружил, что при помещении проводника с током в магнитное поле в нем возникает электрическое поле, перпендикулярное вектору напряженности магнитного поля. Оказывается, магнитное поле действует не только на проводник с током, но и на «электричество» в проводнике. Этот эффект позволил подвергнуть анализу природу электрического тока в проводниках. В частности, Л. Больцман (1844–1906) используя этот эффект, попробовал определить скорость движения электричества в проводнике. Полученное им соотношение было очень близко к математическому выражению силы Лоренца. Эффект Холла коснулся сложного и принципиального вопроса: что смещается в веществе – электрическая жидкость или заряженные частицы?

Экспериментальные факты убедительно свидетельствовали о том, что электричество связано с веществом. Эти взгляды привели к электрону, но пока не ясна была его природа, структура. В конце XIX века интенсивно развивается теория электромагнитного поля Д. Максвелла. Появляются попытки соединить теорию электромагнитного поля с атомистикой. Первые шаги в этом направлении сделаны. Опыты Герца (1888) – блестящее под-

тверждение электромагнитной природы света. Оптика движущихся сред полностью основана на теории электромагнитного поля. Опыты А. Майкельсона (1881) убедительно доказывают отсутствие эфирного ветра. Ряд других экспериментов позволяют сделать важный вывод: наблюдаемые электромагнитные явления обусловлены движением заряженных частичек вещества.

Д.Д. Томсон (1856–1940), приняв точку зрения об атомистической природе электричества, пытается соединить максвелловскую теорию электромагнитного поля с атомистикой. Он высказывает гипотезу о том, что элементарные частицы вещества, основные его структурные элементы, входят в состав всех атомов. Движение этих частиц обуславливает все электрические и оптические процессы. Вместе со своими учениками он провел серию опытов по изучению электрических явлений в газах. Эксперименты с катодными лучами, фотоэлектронами, термоэлектронами позволили вычислить удельный заряд электрона ($\frac{q_e}{m}$).

В 1896 году Д. Томсон совместно со своим учеником Э. Резерфордом обнаружили, что проводимость, вызываемая в газах рентгеновскими лучами, исчезает после фильтрования газа через стеклянную вату или после пропускания струи газа между двумя пластинами при условии, что разность потенциалов между ними велика. В результате проведенных опытов сделан вывод: причину проводимости в газах следует связывать с частицами (которые можно удалить фильтрованием), обладающими электрическим зарядом, т.е. газовыми токами. В 1897 году Д. Томсон впервые определяет удельный заряд этой частицы, наблюдая отклонение пучка катодных лучей, на который действовали совместно электрическое и магнитное поля, создаваемые конденсатором и соленоидом. Эти поля, однородные и перпендикулярные друг другу и к направлению начальной скорости электронов, подбирались так, что след пучка катодных лучей на флуоресцирующем

экране смещался под действием полей. Когда в опыте электрическое поле отсутствовало, под действие магнитного поля электроны двигались по окружности, по формуле $R = \frac{mv}{Bq_e}$ можно было оценить удельный заряд электрона, так как радиус окружности определялся по смещению следа пучка на экране при появлении магнитного поля. Томсон создавал разнообразные условия опыта. Менялись напряженность полей, род газа в разрядной трубке, материалы катодов и стенок трубки, вместо нагрева использовалось действие ультрафиолетовых или рентгеновских лучей, но во всех случаях получались одинаковые значения удельного заряда электрона. Таким образом, опыт показал, что в катодных лучах существуют универсальные «атомы электричества» – электроны с удельным зарядом $\frac{q_e}{m} \approx 1,8 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

Несмотря на то, что к началу XX века была разработана уже классическая электронная теория вещества Друде и Лоренцем, а Д. Томсон измерил удельный заряд элементарной частицы, принимающей участие в электрической проводимости газов, электрон еще не вошел в теорию. Лоренц оперирует непрерывно распределяемой плотностью электрического заряда. Друде, исследуя металлическую проводимость, говорит о дискретном заряде, на величину которого никаких ограничений не накладывается. Нужны были убедительные эксперименты, доказывающие реальность существования электрона. Для этого нужно было выделить его и измерить заряд и массу в отдельности.

Роберт Милликен, американский ученый, предлагает метод капель для измерения заряда электрона (1909). Суть эксперимента в следующем. Скорость движения капли пропорциональна действующей на него силе и не зависит от электрического заряда. Если капля падает только под действием силы тяжести со скоростью v_1 , тогда $v_1 = kmg$. Если на каплю действует еще сила со

стороны электрического поля ($-qE$), то $v_2 = k(qE - mg)$. Разделив первое уравнение на второе $v_1 = kmg$: $v_2 = k(qE - mg)$, получим: $\frac{v_1}{v_2} = \frac{mg}{qE - mg}$. Отсюда

$$q = \frac{mg}{Ev_1}(v_1 + v_2). \quad (4.1)$$

Если капля захватит ион с зарядом q_e , то её скорость станет v'_2 . Тогда величина её заряда окажется $-q'$, а величина захваченного иона $q_e = q' - q$. Подставив в последнюю формулу выражение $q' = \frac{mg}{Ev_1}(v_1 + v'_2)$, получим $q_e = \frac{mg}{Ev_1}(v'_2 - v_2)$. Это соотношение позволяет сделать вывод: величина $\frac{mg}{Ev_1}$ постоянна, захваченный же каплей заряд пропорционален изменению скорости капли. На опыте, измеряя путь, пройденный каплей, и время, в течение которого этот путь пройден, можно измерить элементарный заряд частицы. Исследования показали, что величина заряда капли меняется на $q_e, 2q_e, 3q_e, 4q_e \dots$. Милликен делает вывод, что во всех опытах заряд, захваченный капелькой масла, или в точности равен наименьшему заряду – заряду электрона, либо целому кратному заряду электрона.

Позже различные эксперименты подтвердили существование этой частицы. Так, в опытах А.Ф. Иоффе пылинки цинка, расположенные между горизонтальными пластинами конденсатора, освещались ультрафиолетовыми лучами. Регулируя разность потенциалов между пластинами, можно было добиться неподвижного положения одной из пылинок при условии $Mg = qE$, где M – масса пылинки, q – заряд пылинки, E – напряженность электрического поля.

Через некоторое время для поддержания неподвижного состояния пылинки потребовалось иное значение напряженности поля E_1 , но тогда $Mg = q_1 E_1$; $q_1 = \frac{Mg}{E_1}$.

Отношение скачкообразных изменений заряда в большинстве случаев было равно единице. Следовательно, под действием

ультрафиолетового света заряд пылинки менялся на величину, равную элементарному заряду или кратному ему. Опыты Иоффе подтвердили дискретность электрического заряда.

В 1913 году Л.И. Мандельштам и Н.Д. Папалекси впервые обнаружили возникновение электрического тока в ускоренном проводнике. Быстрые вращательные колебания катушки с обмоткой из медной проволоки вызывали звук в телефоне, присоединенном к ней. Причиной этого был электрический ток, вызванный движением электронов по инерции. Опыты Толмена и Б. Стюарта (1916) подтвердили подобное представление о движении электронов. В их эксперименте индикатором тока служил баллистический гальванометр. Однослойная катушка из медной проволоки приводилась в быстрое равномерное вращение вокруг оси. В начальный момент времени электроны были увлечены этим движением и ток равнялся нулю. Затем катушку внезапно останавливали, а электроны продолжали двигаться по инерции. Это движение прекращалось в некоторый момент времени, когда ток опять оказывался равным нулю. Гальванометр показывал, какой заряд перемещается в цепи. Очевидно, направление перемещения зарядов совпадало с направлением вращения катушки до ее торможения. Отброс стрелки гальванометра показал, что ток имеет противоположное направление. Таким образом было подтверждено представление о том, что ток создается движением заряженных электронов.

В эмпирический базис этой теории входят экспериментально установленные законы Ома, Джоуля–Ленца, Видемана–Франца, гальваномагнитные эффекты.

Значительную роль в развитии электронной теории сыграли исследования русских физиков. Так, В.Ф. Миткевич (1903) раскрыл характер участия электронов в явлении электрической дуги; А. Алексеев и М. Маликов (1909) измерили заряд электрона; Д.С. Рождественский (1909) подтвердил опытным путем электронную теорию дисперсии; Я.И. Френкель (1925) развил

классическую теорию вращающегося электрона; П.А. Черенков (1934) открыл и экспериментально исследовал излучение электрона при движении его в веществе со скоростью, превышающей скорость света в том же веществе; И.Е. Тамм и М.М. Франк (1935) построили теорию этого эффекта; Д.Д. Иваненко, И.Я. Померчук, Л.А. Арцимович, А.А. Соколов (1944–48) разработали релятивистскую теорию излучения электромагнитных волн электронами, движущимися по окружности.

XIX век – столетие эволюционного развития теории. Новые теоретические и экспериментальные факты укладывались в рамки сложившихся механистических представлений. Принципы, модели материи не противоречили классическим законам, а полностью им соответствовали.

Идеализированный объект теории. Классическая электронная теория вещества, как и другие теории, оперирует определенной моделью материального объекта (электрон, ион). Эта модель, естественно, не совпадает с реальной частицей, но соответствует ей, отражает некоторые важнейшие свойства ее. Каковы же эти свойства?

Электрон является основной структурной единицей материи. Это один из видов материи, который взаимодействует дискретно как единое целое во всех известных процессах. В рамках принимаемой модели он подобен маленькому центрально-симметричному заряженному шару. Взаимодействует с другими частицами посредством электромагнитного и слабого взаимодействия. Электрон – наименьшая стабильная элементарная частица с электрическим зарядом $1,6021 \cdot 10^{-19}$ Кл. Этот заряд принят за единицу количества электричества в системе СИ. Классический радиус электрона $r_e = K \frac{q_e^2}{mv^2} = 2,817 \cdot 10^{-15}$ м. Экспериментальных доказательств, касающихся структуры электрона, пока не существует. В семействе элементарных частиц он отнесен к классу лептонов.

Выделим важнейшие свойства частицы в классической электронной теории вещества:

- частица движется по соответствующей траектории, сохраняя свою индивидуальность;
- частица в каждый момент времени обладает определенным положением и скоростью;
- поведение частицы описывается законами, справедливыми для макроскопических тел;
- в основе физических явлений, в которых частица принимает участие, лежат электромагнитные взаимодействия;
- распределение электронов по состояниям подчиняется статистике Максвелла-Больцмана.

Некоторые из названных свойств электрона проявляются и широко используются в явлениях термоэлектронной, фотоэлектронной эмиссии. Электроны, ускоренные до больших энергий в синхротронах, линейных ускорителях и др., являются средством исследования природы элементарных частиц.

Модельные представления, свойства других заряженных частиц (ионов) подобны электронам, поэтому могут быть описаны по такой же схеме.

Для объяснения явления проводимости в классической электронной теории принимается следующая модель среды: вещество сравнивают с ящиком, «заполненным газом» свободных заряженных частиц, подчиняющихся статистике Максвелла-Больцмана. В металлах такими заряженными частицами являются электроны; в электролитах – положительные и отрицательные ионы, в газах – ионы и электроны; в полупроводниках – электроны и дырки. При наличии электрического поля в проводнике заряженные частицы начинают направленно перемещаться, возникает **ток проводимости**. Если упорядоченное движение заряженных частиц обусловлено движением в пространстве проводника, диэлектрика, то в этом случае возникает конвекционный ток. За направление электрического тока принимают движение положительных электрических зарядов.

Понятия и принципы электронной теории вещества.

Для характеристики электрического тока вводят следующие понятия и величины:

Сила тока – скалярная физическая величина, численно равная отношению электрического заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за единицу времени $I = \frac{dq}{dt}$, где dq – элементарный заряд, прошедший через проводник за бесконечно малый промежуток времени. Если за единицу времени через поперечное сечение проводника проходит одинаковое количество электричества, то такой ток называют постоянным:

$$I = \frac{q}{t}. \quad (4.2)$$

Чтобы охарактеризовать распределение электрического тока по сечению проводника, вводят понятие вектора плотности тока (j). Он численно равен силе тока через единицу площади сечения проводника, перпендикулярного к направлению тока:

$$j = \frac{dI}{dS}; \quad dS' = dS \cos \alpha; \quad j = \frac{dI}{dS} \cdot \frac{1}{\cos \alpha}; \quad j_n = j \cos \alpha. \quad (4.3)$$

где dS – , dS' – , α – .

$$j_n = \frac{dI}{ds}; \quad dJ = j_n dS; \quad I = \int_S j_n dS. \quad (4.4)$$

Если электрический ток постоянный, то $J = js$. В проводнике переменного сечения в случае постоянного тока $j_1 s_1 = j_2 s_2$

или
$$\frac{j_1}{j_2} = \frac{s_2}{s_1}. \quad (4.5)$$

В проводнике переменного сечения плотность постоянного тока меняется, она возрастает с уменьшением площади поперечного сечения проводника.

Проводник оказывает сопротивление движению заряженных частиц. Оно объясняется: нарушением периодичности кристаллов (разнообразные дефекты), тепловым движением ионов и столкновением электронов с ионами. За счет этих причин у электрона длина свободного пробега конечна. Как правило, речь

идет о средней длине, среднем времени жизни. Здесь усредняются движения всех электронов (их рассеяние), усредняются препятствия, на которых они рассеиваются. На тепловое движение частиц накладывается упорядоченное их движение под действием поля. Какова скорость электронов (скорость упорядоченного движения), от чего она зависит?

$$j = \frac{I}{S} = \frac{q}{ts} = \frac{Nq_e \lambda}{ts \lambda} = \frac{n_0 q_e l \lambda}{t} = n_0 q_e \bar{v}. \quad (4.6)$$

Следовательно,

$$\bar{v} = \frac{j}{q_e n_0}. \quad (4.7)$$

Еще в XIX веке экспериментально было установлено, что $J = \frac{\Delta \varphi}{R}$. Величина, обратная удельному сопротивлению проводника $\sigma = \frac{1}{\rho}$, получила название удельной электропроводности G , учитывая, что

$$j = \frac{I}{S} = \frac{\Delta \varphi}{sR} = \frac{\Delta \varphi}{s \rho \frac{l}{S}} = \frac{\Delta \varphi \sigma}{l} = \frac{El \sigma}{l} = E \sigma, \\ j = \sigma E. \quad (4.8)$$

Соотношение (4.8) получило название закона Ома для участка цепи в дифференциальной форме. Подставив значение j (4.8) в формулу (4,7), получим

$$\bar{v} = \frac{\sigma E}{q_e n_0} \quad \text{или} \quad \bar{v} = \frac{\sigma}{q_e^2 n_0} \cdot E q_e; \\ \bar{v} = u E q_e, \quad (4.9)$$

где \bar{v} – средняя скорость теплового движения электронов;

$E q_e$ – сила, действующая на электрон;

$u = \frac{\sigma}{q_e^2 n_0}$ – подвижность частицы.

Скорость упорядоченного движения электрона прямо пропорциональна подвижности частицы и силе, действующей на нее со стороны электрического поля

$$\bar{v} = u F. \quad (4.10)$$

Если бы сила сопротивления равнялась нулю, то электроны в проводнике двигались бы ускоренно, в действительности они движутся с постоянной скоростью (средней), поэтому сила сопротивления реально существует. Физическая величина, характеризующая ее, получила название «подвижность». Подвижность – мера несвободы электронов. В системе СИ она измеряется в с/кг , поэтому равна $\mu = \frac{\tau}{m}$. Зная подвижность электронов, можно оценить их время свободного пробега:

$$\tau = m\mu. \quad (4.11)$$

Обычно удельную электропроводность выражают через подвижность из формулы (4.9). Учитывая соотношения (4.11), выразим удельную электропроводность через время свободного пробега

$$\sigma = \frac{n_0 q_e^2 \tau}{m}, \quad (4.12)$$

или длину свободного пробега

$$\sigma = \frac{n_0 q_e^2 \lambda}{mv}. \quad (4.13)$$

Последнее соотношение раскрывает природу проводимости (сопротивления). Она зависит от числа частиц в единице объема, длины пробега и средней скорости теплового движения частиц.

В теории проводимости, уподобив свободные электроны идеальному газу, можно предположить, что для описания электронного газа (как и в случае молекулярно-кинетической теории) применима статистика Максвелла–Больцмана. Ее положения и составляют принципы классической электронной теории вещества:

- все направления теплового движения электронов равновероятны (принцип молекулярного хаоса),
- средняя кинетическая энергия теплового движения электронов пропорциональна абсолютной температуре.

Тепловое движение частиц – хаотическое, оно не может вызвать электрического тока в проводнике. Не могут вызвать

направленного стационарного перемещения электрического заряда и кулоновские силы взаимодействия. Они приводят к равновесному состоянию зарядов, при этом разность потенциалов между двумя любыми точками проводника становится равной нулю, электрическое поле отсутствует. Видимо, для поддержания электрического тока в проводнике нужна другая сила, ее назвали сторонней силой. В отличие от кулоновских, эти силы должны вызвать не соединение разноименных зарядов, а их разделение, что приведет к возникновению разности потенциалов на концах проводника электрического поля. Это поле сторонних сил создается источниками тока: гальваническими элементами, аккумуляторами, электрическими генераторами. Количественной мерой работы сторонних сил служит электродвижущая сила источника тока (ЭДС):

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q}. \quad (4.14)$$

Рассмотрим работу простейшей цепи, содержащей источник тока (рис. 4.1).

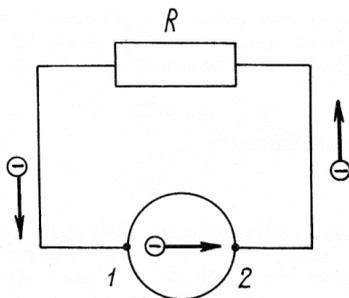


Рис. 4.1

Для того чтобы через потребитель проходил электрический ток, необходимо между точками 1–2 создать постоянную разность потенциалов. Тогда электростатические силы на внешнем участке цепи 2–1 будут совершать работу по перемещению заряда:

$$A_{2-1} = (-q)(\varphi_2 - \varphi_1) = q(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (4.15)$$

Для поддержания постоянной разности потенциалов внутри источника сторонние силы должны «перебрасывать» электроны от точки 1 к точке 2, преодолевая силы электростатического притяжения и отталкивания, направленные внутри источника от точки 2 к точке 1. Источник тока оказывает сопротивление движущимся электронам, работа по определению его согласно закону Джоуля–Ленца внутри источника:

$$A = I^2 r t = q I r. \quad (4.16)$$

где r – сопротивление источника тока. Тогда полная работа сторонних сил будет складываться из работы по преодолению электростатических сил и сил электрического сопротивления внутри источника:

$$A_{\text{ст}} = A_{12} + I^2 r t. \quad (4.17)$$

Работа электростатической силы внутри источника отрицательная, т.к. $\varphi_2 < \varphi_1$,

$$A_{12} = -q(\varphi_1 - \varphi_2) = q(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (4.18)$$

Сторонняя сила направлена по движению электрона, работа ее $A_{1-2} = q(\varphi_1 - \varphi_2)$ равна работе A_{2-1} , совершаемой электростатической силой во внешней цепи. Это значит, что источник тока является источником той работы (энергии), которая совершается электрическим полем во внешней цепи. Чтобы поддержать разность потенциалов $(\varphi_1 - \varphi_2)$ постоянной, сторонним силам необходимо непрерывно совершать работу, равную A_{2-1} , компенсирующую потери энергии во внешней цепи. Тогда полная работа сторонних сил на основании закона сохранения энергии и соотношений (4.15, 4.17, 4.18) равна:

$$A_{\text{ст}} = q(\varphi_1 - \varphi_2) + q I r. \quad (4.19)$$

Отношение работы сторонних сил по перемещению заряда внутри источника к величине этого заряда получило название ЭДС. Подставив (4.19) в (4.14), получим

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q} = (\varphi_1 - \varphi_2) + I r. \quad (4.20)$$

Согласно закону Ома для участка цепи $(\varphi_1 - \varphi_2) = IR$, соотношение (4.20) примет вид

$$\mathcal{E} = IR + Ir . \quad (4.21)$$

ЭДС источника равна сумме падений напряжений во внутреннем и внешнем участках цепи. Ежесекундная работа, совершаемая источником тока, т.е. его мощность, составляет $p = \frac{A}{t} = \frac{\varepsilon q}{t} = \varepsilon I$. Умножив левую и правую части равенства 4.21 на силу тока I , получим

$$\mathcal{E}I = I^2R + I^2r . \quad (4.22)$$

Соотношение (4.22) характеризует энергию, которая выделяется на сопротивлениях во внешней и внутренней цепи в единицу времени.

Если источник тока разомкнуть, то потерь энергии внутри него не происходит, потому что тока внутри источника нет. В этом случае ЭДС источника равна разности потенциалов на его полюсах. Если же источник тока замкнуть на внешнюю цепь, то разность потенциалов между его полюсами будет равна

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \varepsilon - Ir . \quad (4.23)$$

ЭДС – скалярная величина, но она может иметь положительный или отрицательный знак в зависимости от знака работы, совершаемой сторонней силой.

Если в участке электрической цепи содержится ЭДС (рис. 4.1), то разность потенциалов между точками 1–2 равна $\Delta\varphi_{1-2} = \frac{A_{1-2}}{q}$. В этом случае работа A_{1-2} складывается из работы электростатических сил на участке сопротивлением R : $A = I^2R_0t = qIR_0$, численно равной количеству тепла, выделяемому на сопротивлении во внешней и внутренней цепи и работе против сторонних сил внутри источника. Эта работа положительная, если сторонние силы действуют в направлении движения зарядов, и отрицательная, если заряды движутся в обратном направлении, тогда

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1-2}}{q} = \frac{qIR_0}{q} \pm \frac{A_{ст}}{q} = IR \pm \mathcal{E} = I(R + r) \pm \mathcal{E}. \quad (4.24)$$

Если электрическая цепь замкнутая, то $\varphi_1 = \varphi_2$, тогда: $I(R + r) = \mathcal{E}$. Из соотношения (4.24) получим закон Ома для участка цепи, содержащей источник ЭДС

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) \pm \mathcal{E}}{R + r}. \quad (4.25)$$

Теория проводимости металлов. Теория Друде–Лоренца. В 1900 году немецкий физик П. Друде (1863–1906) разработал основы электронной проводимости металлов. Она получила дальнейшее развитие в трудах нидерландского физика Х.А. Лоренца (1853–1928). Эта теория должна была ответить на ряд вопросов, которые возникли к этому времени и потребовали немедленного разрешения:

1. Откуда берутся электроны, которые, как предполагали, могут свободно перемещаться в металлах?
2. В каком состоянии находятся электроны в том случае, если на них действуют электрические силы?
3. Как двигаются электроны?
4. Может ли теория объяснить известные экспериментальные законы Ома, Видемана–Франца, Джоуля–Ленца; зависимость проводимости от размеров и материала проводника, эффект Холла, теплоемкость твердых тел и т.д.?

При построении теории Друде исходил из предположения, что электрический ток в металлах переносится только электронами. Это предположение было экспериментально подтверждено в 1898 году немецким физиком К. Рикке (1845–1915). Для опыта он брал три металлических цилиндра (медный, алюминиевый и медный) одинакового размера. Цилиндры соединялись последовательно. В течение длительного времени через них пропускали электрический ток. За время эксперимента через цилиндры прошел заряд $\sim 10^6$ Кл. Химический анализ не обнаружил ни в одном из пограничных слоев другого металла, который должен был бы

появиться, если бы в проводимости участвовали ионизированные атомы металла.

Опираясь на эти эксперименты, Друде высказывает предположение о существовании свободных электронов, которые ведут себя как одноатомный газ, их он называет электронным газом.

Идея Друде о наличии в металлах свободных электронов была блестяще подтверждена в опытах Толмена и Стюарта (1916).

Электронному газу можно приписать все свойства одноатомного газа, применив основные положения и выводы молекулярно-кинетической теории. Правда, уже тогда Друде отмечал, что не может быть полной аналогии между частицами газа и электронами. Так, МКТ предполагала, что газ состоит из отдельных не связанных друг с другом атомов и молекул, которые взаимодействуют лишь в момент столкновения. Электроны в металлах испытывают огромные силы притяжения со стороны положительных ионов, находящихся в узлах кристаллической решетки и составляющих как бы скелет металла. Если атомы газа движутся прямолинейно и равномерно, то электроны, благодаря силам электрического притяжения и отталкивания, двигаются по криволинейной траектории. Их движение, как и в случае газовых молекул, характеризуется средней длиной свободного пробега (λ) и средней скоростью теплового движения. Максвелловский закон распределения скоростей для большого числа газовых частиц применим и к электронному газу. Квадраты скоростей движущихся частиц пропорциональны их энергии. Максвелл показал, что газовые молекулы в большинстве своем обладают некоторой средней энергией, которая пропорциональна абсолютной температуре. Подобная зависимость существует и для электронного газа.

Тепловое движение вследствие хаотичности не может привести к электрическому току. Но под действием внешней силы электронный газ начинает двигаться упорядоченно со средней

скоростью (\bar{v}). В проводнике возникает электрический ток. Скорости теплового и направленного движения электронов сильно отличаются. Если средние скорости теплового движения частиц при 0°C составляют 110 км/с, то их средние скорости упорядоченного движения под действием поля – 10^{-4} м/с.

Пусть в единице объема N электронов, тогда численное значение силы тока

$$I = \frac{q}{t} = q_e \frac{N\bar{v}}{l} = q_e \frac{N\bar{v}S}{lS} = q_e n_0 \bar{v} S \quad (4.26)$$

$$j = n_0 q_e \bar{v}. \quad (4.27)$$

Соотношения (4.26) и (4.27) получили название основных уравнений классической электронной теории вещества. Сила тока прямо пропорциональна концентрации частиц и средней скорости их теплового движения. Уравнение (4.27) напоминает основное уравнение молекулярно-кинетической теории ($\bar{p} = U_0 KT$).

Исходя из выделенных выше положений теории и уравнений электронной теории проводимости, можно получить многие известные экспериментальные законы. Теория объяснила некоторые явления и процессы, связанные с перемещением электрически заряженных частиц в веществе: законы постоянного тока (Ома, Видемана–Франца, Джоуля–Ленца, Кирхгофа, Вольта, последовательного и параллельного соединений проводников); переменного тока; эффекта Холла; термо- и фотоэлектронную эмиссию.

Закон Ома для участка цепи. Пусть в проводнике течет постоянный электрический ток (средняя скорость упорядоченного движения электронов остается со временем постоянной). Если бы движение электронов происходило без потери энергии, то под действием внешней силы их скорость со временем возрастала бы. Так как она постоянна, то, очевидно, электрон всю энергию, получаемую от электрического поля, передает атомам вещества, совершающим беспорядочное тепловое движение. Это

означает, что в начале каждого свободного пробега электрон имеет только тепловую скорость (v), начальная скорость упорядоченного движения равна нулю (v_0), а конечная v_τ . Тогда за время свободного пробега τ электрон приобретает среднюю скорость (\bar{v});

$$\bar{v} = \frac{v_0 + v_\tau}{2} = \frac{v_\tau}{2}; \quad (4.28)$$

$$v_\tau = a\tau = \frac{F}{m}\tau = \frac{Eq_e\tau}{m}. \quad (4.29)$$

Подставим (4.29) в (4.28), получаем: $\bar{v} = \frac{1}{2} \frac{Eq_e}{m} \tau$. Учитывая, что $\tau = \frac{\lambda}{v}$, соотношение для \bar{v} перепишем

$$\bar{v} = \frac{Eq_e \lambda}{2mv}. \quad (4.30)$$

Решая (4.27) и (4.30) совместно, получим:

$$\bar{v} = \frac{Eq_e \lambda}{2mv}; \quad j = n_0 q_e \bar{v} = \frac{n_0 q_e^2 E \lambda}{2mv} = \frac{n_0 q_e^2 \lambda}{2mv} E. \quad (4.31)$$

Принимая во внимание соотношение (4.13), выражение (4.31) запишем в виде

$$j = \sigma E \quad (4.32)$$

или

$$\begin{aligned} \frac{I}{S} &= \frac{1}{\rho} \frac{El}{l}; \\ I &= \frac{\Delta\varphi}{l} = \frac{\Delta\varphi}{R}; \\ I &= \frac{\Delta\varphi}{R}. \end{aligned} \quad (4.33)$$

Несложные вычисления на основе теории Друде приводят к закону Ома (4.32; 4.33), полученному экспериментально.

Закон Джоуля–Ленца. Рассчитаем энергию, приобретаемую одним электроном за время t под действием внешней силы $F = q_e E$. В конце свободного пробега каждый электрон, как отмечалось выше, теряет скорость упорядоченного движения, передавая иону энергию.

Таких столкновений будет $\frac{t}{\tau}$, где τ – время свободного пробега электрона. Энергию W_1 , приобретенную за счет внешнего поля, он отдает ионам, последняя превращается в тепловое движение атомов:

$$W_1 = \frac{mv_{\tau}^2}{2} \cdot \frac{t}{\tau} = \frac{m}{2} \left(\frac{Eq_e \tau}{m} \right)^2 \frac{t}{\tau} = \frac{q_e^2}{2m} \tau E^2 t. \quad (4.34)$$

Энергия, передаваемая свободными электронами единице объема проводника в единицу времени, составляет:

$$p = \frac{n_0 W_1}{t} = \frac{n_0}{t} \cdot \frac{q_e^2}{2m} \tau E^2 t = \frac{n_0 q_e^2 \tau E^2}{2m}. \quad (4.35)$$

Учитывая, что $\frac{n_0 q_e^2 \tau}{2m} = \sigma$, получаем $p = \sigma E^2$. (4.36)

Выражение (4.36) представляет закон Джоуля–Ленца в дифференциальной форме.

Если однородный цилиндрический проводник имеет длину l и поперечное сечение S , то мощность, выделяемая в объеме $v = Sl$, составит: $P = pV = \sigma E^2 V = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\Delta\varphi}{l} \right)^2 Sl = \frac{\Delta\varphi^2}{\rho \frac{l}{S}} = \frac{\Delta\varphi^2}{R}$,

где R – полное сопротивление проводника;

$$p = \frac{\Delta\varphi^2}{R}; \quad P = I^2 R; \quad P = IU. \quad (4.37)$$

Выражения (4.37) получили названия закона Джоуля–Ленца в интегральной форме.

Соотношения (4.36) и (4.37) хорошо согласуются с экспериментально полученным законом Джоуля–Ленца.

Закон И. Видемана и Р. Франца. В 1853 году И. Видеман и Р. Франц экспериментально установили, что для всех металлов отношение коэффициента теплопроводности (χ) к коэффициенту удельной электропроводности σ – постоянно: $\frac{\chi}{\sigma} = \text{const}$ – при одинаковой температуре. Позже Лоренц показал, что это отношение для металлов прямо пропорционально абсолютной температуре:

$$\frac{\chi}{\sigma} = \alpha T. \quad (4.38)$$

Последнее выражение экспериментально было получено Видеманом и Францем и получило название закона Видемана–Франца.

Электронная теория проводимости металлов позволила теоретически получить этот закон и рассчитать температуру. Полученные результаты хорошо согласовывались с экспериментом. Если допустить, что передача тепла от более нагретого металла к менее нагретому осуществляется в основном электронным газом, то можно воспользоваться формулой для расчета коэффициента теплопроводности, полученной для одноатомного идеального газа $\chi = \frac{1}{2}kn_0\lambda v$. А для электропроводности принять выражение, полученное при выводе закона Ома, $\sigma = \frac{n_0q_e^2\lambda}{2mv}$. Разделив первое на второе, получим:

$$\frac{\chi}{\sigma} = \frac{kmv^2}{q_e^2}. \quad (4.39)$$

Другде пренебрег различиями между квадратом средней скорости теплового движения электронов и средней квадратичной скоростью их движения $(\bar{v})^2 = \overline{v^2}$, тогда

$$\frac{m(\bar{v})^2}{2} = \frac{3}{2}kT, \quad m(\bar{v})^2 = 3kT. \quad (4.40)$$

Подставив (4.40) в формулу (4.39), получим

$$\frac{\chi}{\sigma} = \frac{3k^2T}{q_e^2} \quad (4.41)$$

или

$$\frac{\chi}{\sigma} = \alpha T, \quad (4.42)$$

где α – коэффициент пропорциональности (число Лоренца, равное $\frac{3k^2}{q_e^2}$). Теория рассчитала число Лоренца, оно оказалось равным $\alpha = 2,25 \cdot 10^{-8}$ Дж/Кл²К², а опыт дает для ряда металлов коэффициент, колеблющийся около числа $2,24 \cdot 10^{-8}$ Дж/Кл²К². Как видим, теория хорошо согласуется с экспериментом. Классическая теория вскрыла микроструктуру числа Лоренца, которое определяется отношением мировых констант: постоянной Больцмана и

электрического заряда электрона $\frac{k^2}{q_e^2}$. Поскольку природа носителей тока во всех металлах одна и та же (электроны), то поэтому закон Видемана–Франца выполним для любых металлов независимо от их природы.

Эффект Холла. Американский физик Э. Холл в 1880 году экспериментально доказал, что при прохождении электрического тока через проводник, изготовленный из золота, расположенный в магнитном поле (рис. 4.2), возникает разность потенциалов, прямо пропорциональная силе тока, индукции магнитного поля, и обратно пропорциональная ширине пластинки

$$\Delta\varphi_{AC} = R\ell jB, \quad (4.43)$$

где ℓ – ширина пластинки, j – плотность тока, B – магнитная индукция, R – постоянная Холла, зависящая от материала пластинки.

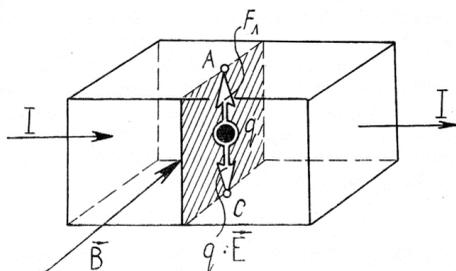


Рис. 4.2

Для одних веществ эта константа положительная, для других – отрицательная. Изменение направления поля или тока в пластине меняет знак разности потенциалов. Классическая электронная теория объяснила экспериментальные результаты Холла. Она вскрыла микроструктуру постоянной Холла. Согласно теории

$$I = q_e n_0 \bar{v} S = q_e n_0 \bar{v} a \cdot b; \quad \bar{v} = \frac{I}{q_e n_0 a \cdot b}, \quad (4.44)$$

где a – длина пластинки, b – ширина.

Заряженные частицы под действием силы Лоренца смещаются к точке A или C в зависимости от направления силы тока и магнитного поля (рис. 4.2). По мере их смещения между точками A и C возникает разность потенциалов $\Delta\varphi$, со стороны электрического поля на заряженную частицу между точками A и C будет действовать сила $F_{\text{Э}} = q_e E$. Изменение зарядов боковых сторон прекращается, если эти силы уравниваются:

$$F_{\text{Э}} = E_{\text{л}}; \quad q_e E = q_e \bar{v} B \quad \text{или} \quad E = \bar{v} B, \quad v = \frac{E}{B}. \quad (4.45)$$

Если пластинка длинная и широкая, то подобно конденсатору поле между точками A и C можно считать однородным, тогда:

$$\Delta\varphi_{AC} = E a = \bar{v} B a = \frac{I B a}{q_e n_0 a b} = \frac{I B}{q_e n_0 b} = \frac{1}{q_e n_0} \frac{I B}{b}. \quad (4.46)$$

Из сравнения полученного выражения (4.46) с формулой, полученной Холлом экспериментально (4.43), следует, что постоянная Холла $R = \frac{1}{q_e n_0}$. Знак константы, как видно из формулы, совпадает со знаком заряда. Измеряя, например, постоянную Холла для полупроводника, можно судить о природе его проводимости. В случае электронной проводимости $R < 0$, при дырочной $R > 0$.

Если в полупроводнике имеются и те, и другие носители заряда, то по знаку постоянной Холла можно судить, какой тип проводимости является преобладающим. Константа Холла позволяет рассчитать:

- концентрацию электронов $n_0 = \frac{1}{q_e R}$; (4.47)

- длину свободного пробега электронов из формулы

$$\sigma = \frac{n_0 q_e^2 \bar{\lambda}}{2 m v}. \quad (4.48)$$

Подставляя в (4.48) выражение (4.47), получим

$$\bar{\lambda} = \frac{2 m \bar{v} \sigma R}{q_e}. \quad (4.49)$$

Расчеты показали, что средняя длина свободного пробега в металлах оказалась сравнительно большой ($\lambda \approx 10^{-6}$ см), в сотни раз больше размеров кристаллической решетки.

Расчет различных электрических цепей постоянного тока представляет большой практический интерес. Здесь достаточно классического описания явлений. Как уже отмечалось, при движении электрических зарядов нарушается равновесное их состояние, поверхность проводника перестает быть эквипотенциальной. Внутри проводника возникает электрическое поле, энергетической характеристикой которого является разность потенциалов. Электрические заряды в случае установившегося движения не накапливаются ни в одной точке проводника, в том числе на разветвленных участках цепи. Алгебраическая сумма зарядов в любой точке цепи – величина постоянная

$$\sum_{i=1}^n q_i = const. \quad (4.50)$$

На основании закона сохранения электрического заряда (4.50) сформулировано:

– первое правило Кирхгофа: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю,

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0, \quad (4.51)$$

n – число проводников, сходящихся в узле;

– второе правило Кирхгофа – обобщение закона Ома для разветвленных цепей. Последний явился математическим выражением закона сохранения и превращения энергии в электрических цепях: *в замкнутом контуре алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжений на сопротивлениях контура:*

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i = \sum_{i=1}^n I_i R. \quad (4.52)$$

Для простых электрических цепей с последовательным соединением проводников $I_0 = const$ из закона Ома для участка цепи имеем:

$$\frac{u_1}{R_1} = \frac{u_2}{R_2} \quad \text{или} \quad \frac{u_1}{u_2} = \frac{R_1}{R_2}; \quad R_0 = R_1 + R_2,$$

где R_0 – общее сопротивление последовательно соединенных R_1 и R_2 проводников.

При параллельном соединении: $u_0 = \text{const}$ из закона Ома для участка цепи можно записать: $I_1 R_1 = I_2 R_2$ или

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}; \quad \frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Процессы, происходящие в цепях переменного тока, тоже можно объяснить на основе классической электронной теории. Электронный газ в таких цепях движется так, что его направление, сила тока и напряжение в каждый момент времени меняются по гармоническому закону $i = I_m \sin \omega t$; $u = u_m \sin \omega t$. В цепи с активным сопротивлением $R_0 = \rho \frac{l}{S}$ они меняются синфазно. В цепи с индуктивным ($R_L = \omega L$) и емкостным ($R_C = \frac{l}{\omega C}$) сопротивлениями между силой тока и напряжением возникает сдвиг по фазе. Для мгновенных (максимальных) значений сил тока и напряжения выполняется закон Ома для участка цепи $I_m = \frac{\Delta \varphi_m}{R}$. В цепи с активным сопротивлением, где сила тока и напряжение меняются синфазно, общее сопротивление цепи можно рассчитать по законам постоянного тока. Если же цепь представляет последовательно соединенное активное, емкостное и индуктивное сопротивление, то с учетом фазовых соотношений между напряжением и силой тока их складывать можно геометрически. Общее сопротивление в цепи равно $\sqrt{R_a + (R_L - R_C)^2}$, где $(R_L - R_C)$ – реактивное сопротивление. Важной величиной, характеризующей фазовые соотношения между напряжениями, токами в цепи переменного тока является $\cos \varphi = \frac{\Delta \varphi_a}{\Delta \varphi_0}$, равный отношению падения напряжения на активной нагрузке к общему напряжению в цепи с активным, индуктивным и емкостным сопротивлением. Работа и мощность в цепи переменного тока зависят от этого

коэффициента ($\cos \varphi$). Последняя рассчитывается как $p = I_g U_g \cos \varphi$, где I_g , U_g – действующие значения сил тока и напряжений в цепях переменного тока, их численные значения:

$$I_g = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; \quad U_g = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

В цепях переменного тока закон Ома для участка цепи, закон Джоуля–Ленца применимы тоже, но только для амплитудных или действующих значений силы тока и напряжения.

Термоэлектрические и эмиссионные явления. Электронный газ в металлах находится в беспорядочном тепловом движении. Согласно закону распределения частиц по скоростям, сформулированному Максвеллом, в заданном объеме всегда имеются электроны, скорость которых больше средних скоростей движения частиц. Электроны с достаточно большой кинетической энергией могут быть вырваны из металла. В пространстве около проводника они образуют электронное облако, которое удерживается избыточным положительным зарядом ионов у поверхности проводника. Электроны, вылетевшие за пределы металла, обедняют его поверхностный слой. По сравнению с отрицательным электронным облаком этот слой становится заряженным положительно. Именно он и удерживает электроны вблизи поверхности металла. Между электронным облаком и электронным газом в металле устанавливается динамическое равновесие. Число электронов, покинувших металл в единицу времени, равно по числу электронам, вернувшимся в металл обратно. Работа, совершаемая электронами при выходе из металлов, получила название «работы выхода». Она зависит от природы металла, качества поверхности. Для чистых металлов эта работа примерно равна нескольким электронвольтам. Между металлом и окружающим его пространством электронным облаком образуется электрический слой-поле, разность потенциалов которого численно равна

работе выхода электрона из металла $\Delta\varphi = \frac{A}{q_e}$, получившая название контактной разности потенциалов. За пределами этого слоя электрического поля нет. Поэтому весь объем металла для электронного газа представляет собой «потенциальную яму», глубина которой равна работе выхода электронов из металла.

Интересные явления наблюдаются в контактном слое двух разнородных металлов. Пусть работа выхода для первого металла – A_1 , для второго – A_2 , $A_1 > A_2$. Тогда, если металлы привести в соприкосновение, то электроны из второго металла будут переходить в первый, при этом они заряжаются разноименно. В контактном слое металлов возникает разность потенциалов – внутренняя контактная разность потенциалов. В окружающем металлы пространстве вблизи контактного слоя возникает внешняя контактная разность потенциалов, являющаяся энергетической характеристикой электростатического поля, окружающего проводники. Это явление было открыто А. Вольтом. Он экспериментально установил два закона:

1. Контактная разность потенциалов зависит от химического состава разнородных металлов и температуры.

2. Разность потенциалов между концами цепи, состоящей из последовательно соединенных металлических проводников, равна контактной разности потенциалов непосредственно соединенных крайних проводников и не зависит от химического состава промежуточных проводников $T = const$.

Причину этого явления можно объяснить на основании электронной теории вещества. Электронный газ согласно этой теории ведет себя так же, как идеальный, а для него $\bar{p} = n_0 kT$. Применим эти выводы для объяснения описанного явления. Если температура двух разнородных металлов одинакова, то различные концентрации числа электронов в единице объема вызовут давление электронного газа. Если $n_1 > n_2$, то $p_1 > p_2$. За счет

разности давления электроны будут переходить из первого металла во второй. Возникшее в контактном слое электрическое поле будет препятствовать перемещению электронов за счет разности давлений. При установившемся равновесии между этими процессами в слое между разнородными металлами установится контактная разность потенциалов. Подобные рассуждения можно привести для случая, когда температуры разнородных металлов неодинаковы, тогда перепад давлений Δp в контактном слое возникает за счет разности температур. Перепад давлений электронного газа вызывает его перемещение. Если два разнородных металла входят в замкнутую цепь, то в ней возникает электрический ток, работа которого характеризуется термоэлектродвижущей силой: $\varepsilon_0 = \alpha(T_1 - T_2)$, где T_1 – температура спаев первого контактного слоя; T_2 – второго; α – постоянная, характеризующая свойства контакта. Для того чтобы в этой замкнутой цепи электрический ток существовал длительное время, необходимо поддерживать разницу температур спаев: горячий – нагревать, а холодный – охлаждать. Такие термоэлектрические явления широко применяются в настоящее время для измерения температур. Приборы, принцип действия которых основан на описанных выше процессах, получили название термоэлементов, или термопар. Эти приборы позволяют измерять температуры от нескольких градусов до десятков тысяч. Они очень чувствительны, позволяют не только измерять температуру, но и следить за ее изменением с течением времени. Соединяя термопары последовательно, получают термобатарей. Они нашли широкое применение в различных контрольных и автоматических устройствах.

Если пропустить электрический ток через контакт двух разнородных металлов (рис 4.3), то контактный слой одного металла будет нагреваться, другого – охлаждаться. Этот эффект был исследован И.Ш. Пельтье (1834). Если направление электрического тока совпадает с термоэлектрическим при условии, что

$T_1 > T_2$, то спай 1 будет нагреваться, потому что электроны тормозятся электрическим полем в направлении 1–2, а в направлении 2–1 ускоряются. Поэтому температура спаия 2 понижается. Изменив направление электрического тока на противоположное, спай 1 будет охлаждаться, а спай 2 – нагреваться. Этот эффект может быть использован в холодильных установках.

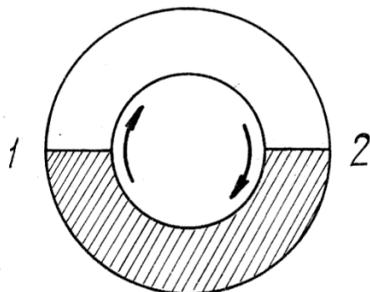


Рис. 4.3

Широкое применение нашло явление термоэлектронной эмиссии. Суть его заключается в том, что нагретые металлы испускают электроны. В электрическом поле эти электроны начинают направленно двигаться, поэтому возникает термоэлектронный ток. Сила этого тока зависит от температуры катода, материала катода и напряжения между катодом и анодом (электродами, создающими поле). Это явление – неперемное условие работы вакуумных приборов: электронных ламп, электронного осциллографа и т.д. Вопросы этой темы подробно изучаются на уроках в средней школе, поэтому мы их не рассматриваем.

Различают холодную, фотоэлектронную, вторичную эмиссию. Вид эмиссии определяется тем, какими способами электродам сообщается энергия, необходимая им для выхода из металлов. Электроны могут быть вырваны из металла электрическим полем (холодная эмиссия). Если электроны вырываются светом, то это

фотоэлектронная эмиссия. Если поверхность металла бомбардировать электронами больших энергий, то часть электронов отражается от поверхности металлов, другая часть вырывает электроны из металлов, такая эмиссия получила название вторичной.

Недостатки и противоречия электронной теории проводимости металлов. Согласно теории Друде–Лоренца теплопроводность металлов определяется теплопроводностью электронного газа. При таком подходе следует предположить, что тепловая энергия колебательного движения атомов ионов кристаллической решетки должна полностью определяться тепловой энергией электронов. Это возможно только в том случае, если число электронов в единице объема велико, т.е. сравнимо с числом атомов (ионов) в единице объема. Выводы электронной теории по данному вопросу не согласуются с экспериментально установленным законом Дюлонга и Пти.

Грамм-атомная теплоемкость металла на самом деле складывается из атомной теплоемкости кристаллической решетки (6 кал/моль · град.) и теплоемкости электронного газа (3 кал/моль · град.). Тогда грамм-атомная теплоемкость металла должна быть 9 кал/моль · град. Согласно закону Дюлонга и Пти теплоемкость грамм-атома металла (атомная теплоемкость) оказалась равной 6 кал/моль · град. Она будет такой, если предположить, что тепловая энергия металлов определяется только кинетической энергией атомов (ионов). Сопоставление теоретических и экспериментальных значений теплоемкости металлов позволяет сделать вывод: электронный газ не дает вклада в теплоемкость металла. Это возможно только в том случае, если энергия беспорядочного теплового движения электронов не изменяется с температурой. Классическая электронная теория не смогла объяснить отсутствия электронного вклада в теплоемкость металлов при высокой температуре.

В начале XX века опыты по измерению c_v при $T \rightarrow 0$ дали результаты, не согласующиеся с законом Дюлонга и Пти. Обнаружено, что при $T \rightarrow 0$ $c_v \rightarrow 0$, т.е. теплоемкость зависит от температуры.

Классическая электронная теория не смогла объяснить температурной зависимости удельного сопротивления от температуры. Опыты показали, что $\rho \sim T$ или $\sigma \sim \frac{1}{T}$. Теория Друде–Лоренца дает результат $\rho \sim \sqrt{T}$. Для того чтобы согласовать теоретические выводы с экспериментальными, необходимо было сделать предположение: средняя длина свободного пробега электронов должна быть в сотни раз больше размеров решетки кристаллов, т.е. эти огромные расстояния электрон должен пройти без столкновений. Это противоречило теории Друде–Лоренца, но подтвердилось на опыте с эффектом Холла. Классическая теория не смогла объяснить: нарушения закона Видемана–Франца в области низких температур; положительного знака постоянной Холла для ряда металлов, зависимости теплоемкости металлов от температуры при $T \rightarrow 0$.

Электрическая проводимость жидкостей. В результате электролитической диссоциации в растворах появляются свободные ионы, положительные и отрицательные; направленное их перемещение под действием внешнего электрического поля и составляет электрический ток в электролитах. Тепловое направленное движение заряженных ионов можно сравнить с движением электронного газа в металле. Сила электрического тока, обусловленная положительными ионами, равна

$$I_+ = \frac{q_+}{t} = \frac{Nq_+\bar{v}_+}{l} = \frac{Nq_+\bar{v}_+S}{S \cdot l} = n_{0+}q_+\bar{v}_+S, \quad (4.53)$$

плотность тока

$$j_+ = n_{0+}q_+\bar{v}_+, \quad (4.54)$$

где n_{0+} – концентрация положительных ионов, \bar{v}_+ – скорость положительных ионов.

Сравним полученные выражения с основным уравнением классической электронной теории вещества (4.26); (4.27). При равномерном движении иона равнодействующая сил, действующих на ион, равна нулю:

$$\vec{F}_l + \vec{F}_{\text{тр}} = 0, \quad F_{\text{тр}} = \eta_+ v_+$$

$$Eq = \eta_+ \bar{v}_+, \quad \bar{v}_+ = \frac{q_+}{\eta_+} E,$$

η_+ – «коэффициент трения» положительного иона;

$u_+ = \frac{q_+}{\eta_+}$ – подвижность иона; тогда

$$\bar{v}_+ = \bar{u}_+ E. \quad (4.56)$$

Подвижность иона равна средней скорости движения под действием поля, напряженность которого E ;

$$u = \frac{\bar{v}}{E}. \quad (4.57)$$

Выражение (4.56) подставим в формулу (4.54), получим

$$j_1 = n_{0+} q_+ \bar{v}_+ = n_{0+} q_+ u_+ E. \quad (4.58)$$

Плотность силы тока, создаваемая отрицательными ионами –

$$j_- = n_{0-} q_- u_- E. \quad (4.59)$$

Результирующая плотность $j = j_+ + j_-$

$$j = q_+ n_{0+} u_+ E + q_- n_{0-} u_- E. \quad (4.60)$$

Т.к. электролит нейтральный, то $n_{0+} q_+ = n_{0-} q_-$. Учитывая это, получаем

$$j = n_{0+} q_+ E (u_+ + u_-). \quad (4.61)$$

Соотношение (4.61) – это основное уравнение электронной проводимости электролитов.

Заряд положительного иона равен заряду отрицательного электрона, умноженному на валентность положительного иона:

$$q_+ = q_e z_+, \quad \text{тогда} \quad q_e = \frac{F}{N_A}; \quad q_+ = \frac{F}{N_A} z_+, \quad (4.62)$$

где F – число Фарадея, $F = 9,65 \cdot 10^4 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$

Подставим выражение (4.62) в формулу (4.61), получим:

$$j = n_{0+}q_+(u_+ + u_-)E = E \frac{F}{N_A} z_+ n_{0+} (u_+ + u_-) \quad (4.63)$$

По аналогии с уравнением электронной проводимости для металлов (4.27) выражение $\frac{F}{N_A} z_+ n_{0+} (u_+ + u_-)$ получило название удельной электропроводности электролитов, а величина обратная – удельное сопротивление электролитов $\rho = \frac{N_A}{F z_+ n_{0+} (u_+ + u_-)}$; тогда $j = \frac{E}{\rho}$.

$$\frac{1}{\rho} = \sigma, \quad j = \sigma E = \frac{E}{\rho}. \quad (4.64)$$

С увеличением температуры удельное сопротивление проводника уменьшается, а проводимость увеличивается за счет увеличения подвижности ионов и концентрации их.

Выражение (4.64) получило название закона Ома для плотности тока в электролитах.

Электрическая проводимость газов. В обычных условиях молекулы газа электрически нейтральны, поэтому он является неплохим изолятором. Если вследствие каких-то причин (сильный нагрев, бомбардировка молекул газа быстро движущимися электронами или ионами, ультрафиолетовое или рентгеновское облучение) газ ионизируется, т.е. молекулы газа расщепляются на электроны и положительные ионы, то в пространстве появляются заряженные частицы, которые будут вести себя так же, как электронный газ в металлах или положительные и отрицательные ионы в электролитах. В отсутствие электрического поля ионы и электроны газа двигаются хаотически. Беспорядочное движение их приведет к тому, что электроны присоединятся (захватятся) нейтральными атомами, при этом образуются отрицательные ионы. Проводимость ионизированного газа обусловлена разноименными ионами и электронами. Их направленное движе-

ние под действием электрического поля и представляет электрический ток в газах. В силу исторических причин его называют **электрическим разрядом в газах**. Различают несамостоятельный и самостоятельный разряды в газах. Несамостоятельный разряд происходит только под действием внешнего ионизатора. Несамостоятельный разряд сходен с электрическим током в электролитах. При небольших напряжениях для него будет выполняться закон Ома: плотность тока пропорциональна напряженности поля $j = q_+ n_{0+} (u_+ + u_-) E$, где u_+ и u_- – подвижность положительных и отрицательных ионов. Она зависит от давления газов, как показали опыты, обратно пропорциональна давлению; q_+ – заряд положительных ионов, равный заряду электрона; n_{0+} – концентрация положительных ионов, равная концентрации электронов. Учитывая это, можно считать, что $q_+ = q_-$; $n_{0+} = n_0$, где n_0 – концентрация заряженных частиц (число пар ионов в единице объема), тогда плотность электрического тока в газах будет равна

$$j = q_e n_0 (u_+ + u_-) E . \quad (4.65)$$

Это выражение получило название основного уравнения электронной проводимости в газах. Оно справедливо лишь при небольших напряжениях. Дальнейшее повышение напряжений не приведет к повышению силы тока, так как все заряженные частицы, созданные внешним ионизатором, достигнут электродов. Анализируя уравнение электронной проводимости, можно сказать, что при $n_0 = \text{const}$; $(u_+ + u_-) = \text{const}$ сила тока становится постоянной и максимальной при данном напряжении. Говорят – ток достиг насыщения.

Дальнейшее повышение напряжения между электродами в газовом промежутке приведет к тому, что кинетическая энергия электронов в поле настолько возрастает, что при столкновении с атомами они могут вызвать ударную ионизацию – вырывание электронов из нейтральных атомов. При этом концентрация заряженных частиц возрастает, электрический ток резко возрастает.

В газе наступает так называемый электрический пробой. Электрический ток не прекращается, если даже убрать внешний ионизатор. Такой разряд в газах получил название самостоятельного.

Электрическая проводимость полупроводников. Вещества, электропроводность которых меньше, чем у металлов, но больше чем у диэлектриков, получили название полупроводников (ρ металлов = $10^{-8} - 10^{-6}$ Ом·м; ρ диэлектриков $\approx 10^8 - 10^{13}$ Ом·м; ρ полупроводников $\approx 10^{-2} - 10^6$ Ом·м). Полупроводники отличаются от металлов и диэлектриков прежде всего рядом важнейших свойств, характеризующих их. Этим веществам свойственна высокая чувствительность к внешним воздействиям: нагреву, облучению, к малым концентрациям различных примесей. Добавки позволяют изготавливать полупроводники с любыми наперед заданными свойствами. У них отрицательный температурный коэффициент электросопротивления в области высоких температур.

Свойства кристаллических полупроводников можно объяснить на основе зонной теории твердого тела, которая содержит в себе элементы квантовой и классической физики. Согласно этой теории электроны в твердом теле обладают широким спектром разрешенных энергий (разрешенные зоны) и запрещенных. Такие энергии, которые электрон не может иметь называют запрещенными. Каждая разрешенная зона (ее ширина несколько эВ) содержит большое число густо расположенных энергетических уровней. Их столько, сколько атомов в кристалле. Заполненным уровням атома соответствуют заполненные зоны. Если заполненная зона содержит N уровней, то, согласно принципу Паули, она включает $2N$ электронов. Уровни валентных электронов образуют частично заполненную зону. В электропроводности принимают участие электроны частично заполненных зон. У всех металлов при любой температуре имеется зона, частично заполненная электронами. Наличие её является характерным признаком

проводимости. В случае одновалентных металлов зона проводимости заполнена ровно на половину (это -зоны), поэтому даже при $T = 0$ под действием внешнего электрического поля электроны могут увеличивать свою энергию, переходя на более высокие уровни, образуя электрический ток. Возможны случаи, когда валентная зона и зона проводимости перекрываются (например, у щелочноземельных и переходных металлов), при этом электроны под влиянием поля могут переходить на свободные уровни вышележащей зоны.

Если валентная зона заполнена, а свободная (зона проводимости) отделена от первой **широкой** запрещенной зоной (~ 10 эВ), то такие вещества получили название диэлектриков. В них энергии электрического поля явно недостаточно, чтобы перевести электроны из валентной зоны в зону проводимости, а так как в последней нет свободных электронов, то такие вещества не будут проводить электрического тока.

В полупроводниках при $T \rightarrow 0$ нет частично заполненной зоны, но ширина запрещенной зоны мала по сравнению с диэлектриками. При температуре $T > 0$ возрастает кинетическая энергия электронов, при этом они могут из валентной зоны перейти в зону проводимости, преодолев энергетический барьер запрещенной зоны. Электропроводность полупроводников обусловлена наличием электронов в зоне проводимости, а также свободных уровней (валентных мест) в валентной зоне, которые могут быть заняты электронами этой зоны. Во внешнем электрическом поле они двигаются в направлении, противоположном движению электронов, так, словно они обладают положительным зарядом, равным по величине заряду электрона. Эти вакантные места назвали «дырками». Направленное движение электронов в зоне проводимости, а дырок в валентной зоне и составляет электрический ток в полупроводнике. На рис. 4.6 приведена схема зонной диаграммы полупроводника. Концентрация электронов в зоне

проводимости и дырок в валентной зоне зависит от температуры. Эта зависимость может быть получена из закона Больцмана

$$n = n_0 e^{\frac{\Delta E}{kT}}, \quad (4.66)$$

где ΔE – энергия, характеризующая ширину запрещенной зоны; n_0 – коэффициент пропорциональности (рис. 4.4а). Удельное сопротивление полупроводников с повышением температуры убывает по экспоненциальному закону

$$\rho = \rho_0 e^{\frac{\Delta E}{kT}}, \quad (4.67)$$

где ρ_0 – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность удельного сопротивления (рис. 4.4б).

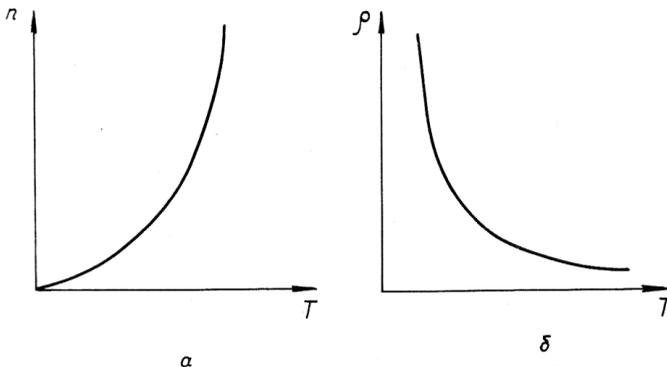


Рис. 4.4

Электропроводность полупроводников определяется концентрацией электронов и дырок, а также их подвижностью. Подвижность носителей тока равна отношению средней скорости направленного движения частиц (\bar{v}) к напряженности электрического поля (\vec{E}). В полупроводниках плотность электрического тока на основе электронной теории вещества (по аналогии с металлами) определяется напряженностью электрического поля и электрической проводимостью:

$$j = \sigma E. \quad (4.68)$$

Электропроводность полупроводников:

$$\sigma = q_e(u_n n + u_p p), \quad (4.69)$$

где u_n и u_p – подвижность электронов и дырок; n и p – концентрация электронов и дырок.

Рассмотренная нами электропроводность чистых полупроводников получила название собственной электропроводности.

Как уже отмечалось, примеси оказывают значительное воздействие на электропроводность полупроводников. Уже тысячные доли процента примесей могут уменьшить сопротивление полупроводников в сотни тысяч раз. Какой механизм влияния примесей на электропроводность полупроводников? Рассмотрим пример. В четырехвалентный германий внесли атомы пятивалентного мышьяка. Один из валентных атомов мышьяка не участвует в связях с электронами атома германия. С точки зрения классической электронной теории вещества, он становится свободным и обуславливает электронную проводимость полупроводника (проводимость n -типа). Полупроводник, обладающий такой проводимостью, получил название «полупроводник n -типа», а примесь, создающая такую проводимость, – донорной. С точки зрения зонной теории, мышьяк образует донорные примесные уровни (д.у.), которые находятся вблизи дна зоны проводимости (рис. 4.5). Энергия E_g , отделяющая эти уровни от зоны проводимости, незначительная (0,01 эВ). При $T \rightarrow 0$ уровни "донорной зоны", как и валентной, полностью заполнены. При повышении температуры электроны из «донорной зоны» переходят в зону проводимости. Их направленное движение под действием внешнего поля в зоне проводимости и составляет электрический ток.

Если в четырехвалентный германий добавить трехвалентный индий (или бор), то при $T \rightarrow 0$ все ковалентные связи электронов в атоме германия будут укомплектованы, не хватает только одной связи у бора. При $T > 0$ он может насытить свои связи за счет электрона соседних атомов. При этом атом индия

(бора) станет отрицательным ионом, а в германии появится дырка. Подобные примеси получили название акцепторных, полупроводники с такой проводимостью (р-типа) получили название полупроводник р-типа. С точки зрения зонной теории акцепторные уровни (а.у.) расположены ближе к зоне валентной и при $T \rightarrow 0$ не заняты электронами (рис. 4.6). При $T > 0$ электроны из валентной зоны с большей вероятностью будут переходить в "зону акцепторных примесных уровней", так как они ближе расположены к валентной зоне. Образовавшиеся дырки в валентной зоне, двигаясь направленно под воздействием внешнего поля, создают условия для дырочной электропроводности.

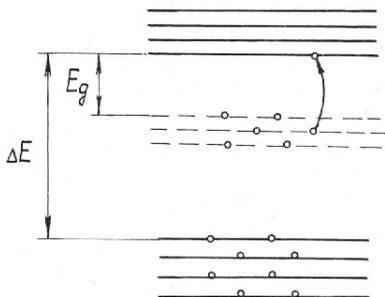


Рис. 4.5

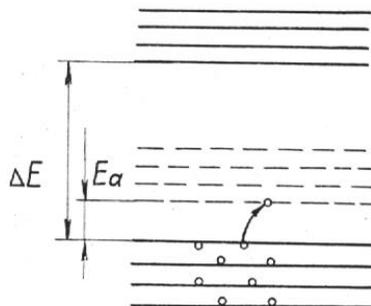


Рис. 4.6

Односторонняя проводимость контакта для полупроводников n- и p-типа нашла широкое применение: "выпрямление" переменного тока, детектирование, преобразование частоты, усиление и генерация электрических колебаний и т.д.

Электрические свойства вещества. Известно, что все вещества по своим электрическим свойствам делятся на проводники и диэлектрики. С точки зрения классической электронной теории вещества в проводнике свободные электроны, направленно перемещаясь под действием электрического поля, и создают электрический ток. Выше мы подробно рассмотрели

закономерности, связанные с направленным движением заряженных частиц в проводниках.

Диэлектрики – большой класс веществ, имеющий практическое применение, проанализируем их свойства. В них, в отличие от проводников, связанные электрические заряды без дополнительных затрат энергии не могут покинуть атомы и молекулы. В нейтральных молекулах диэлектрика центры отрицательных зарядов (электронные облака) и положительных ядер могут не совпадать, в этом случае молекулу называют полярной, она является электрическим диполем, момент которого равен $p = ql$, где q – заряд частицы; l – плечо диполя. В результате теплового действия в отсутствие электрического поля, подобно парамагнетикам, диполи ориентированы так, что суммарное электрическое поле диэлектрика в отсутствие внешнего поля равно нулю. Под действием внешнего электрического поля диэлектрики поляризуются, т.е. диполи ориентируются по полю.

Существуют и неполярные диэлектрики. В них центры положительных и отрицательных зарядов молекул совпадают, электрический момент такой молекулы равен нулю. Если неполярный диэлектрик поместить в электрическое поле, то электронные оболочки атомов, образующих молекулу, деформируются. При этом происходит разделение центров положительных и отрицательных зарядов, неполярный диэлектрик в электрическом поле поляризуется, приобретая дипольный момент.

Положительные и отрицательные заряды в диэлектриках разделить невозможно. Разрезав диэлектрик на две части, на концах его опять обнаружится во внешнем электрическом поле заряд противоположного знака. Заряд, который возникает на поверхности диэлектрика в электрическом поле, называют индуцированным, или связанным. Опыты показали, что поляризация диэлектрика уменьшает электрическое поле в ϵ раз. Поляризационные заряды внутри диэлектрика создают поле, вектор напряженности которого направлен против вектора напряженности внешнего

поля. Результирующее поле будет равно разности напряженности поля внешнего и поля диэлектрика, поэтому и сила взаимодействия между заряженными частицами в среде будет меньше, чем в вакууме.

Есть такие вещества (стекло, эбонит), в которых поляризационные заряды сохраняются в отсутствии поля. Через некоторое время вследствие теплового движения дипольные молекулы ориентируются так, что поляризационные заряды в них исчезают. Однако есть диэлектрики (подобно ферромагнетикам), которые длительное время сохраняют наэлектризованное состояние и создают в окружающем пространстве электрическое поле.

В 1896 году английский физик О. Хевисайд, исходя из аналогий в поведении различных веществ в постоянном и магнитном полях, высказал интересное предположение. Подобно постоянным магнитам, в природе должны существовать «постоянно заполяризованные» диэлектрики, он предложил их назвать электретами. В 1920 году японский физик Егучи изготовил электреты из смеси канифоли и пчелиного воска. Изготовленный образец в нагретом состоянии помещали в сильное магнитное поле. В нем полярные молекулы воска определенным образом ориентировались. При охлаждении образца до комнатной температуры в присутствии поля молекулы теряли способность к вращению. Благодаря сильному взаимодействию, поляризованные молекулы сохраняли определенную ориентацию в отсутствии электрического поля. Если электреты получены нагреванием диэлектрика до точки плавления, а затем охлаждением его в сильном электрическом поле, то такие электреты получили название термоэлектретов. Нагрев можно заменить радиоактивным облучением, иногда достаточно освещения видимым светом или ультрафиолетовыми лучами. В последнее время они нашли широкое применение в качестве источника постоянного электрического поля: в электретных микрофонах и телефонах, вибродатчиках. Действие генератора слабых переменных сигналов основано на индуцировании

переменного тока в электрическом поле электрета. Это явление возникает в результате колебания металлических электродов под влиянием звука, вибрации и т.д. Эти вещества, обладающие остаточной поляризацией, используются в электрометрах, электростатических вольтметрах. Из них делают барометры, гигрометры, газовые фильтры и т.д.

В 1921 году чехословацкий ученый Валашек обнаружил интересные свойства у сегнетовой соли (двойная натро-калиевая соль винной кислоты). Подробные исследования проведены советскими физиками И.В. Курчатовым и П.П. Кобеко. Названная соль (диэлектрик) обнаружила явление самопроизвольной (в отсутствии поля) поляризации. В 1944 году советский ученый Б.В. Вул обнаружил подобные свойства у титаната бария (BaTiO_3), позже были открыты новые соединения. В настоящее время известно более ста чистых соединений, которые обладают такими же свойствами, их назвали сегнетоэлектриками. Диэлектрическая проницаемость этих веществ достигает огромных значений (сотни тысяч).

Если в обычных диэлектриках напряженность поля не влияет на их диэлектрическую проницаемость, то в сегнетоэлектриках эта зависимость значительна. Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков сильно зависит от температуры. При температуре выше T_k (для титаната бария, например, 120°) сильное тепловое движение разрушает упорядоченную ориентацию дипольных молекул, при этом сегнетоэлектрик превращается в обычный диэлектрик. Сегнетоэлектрики нашли широкое применение. Большая диэлектрическая проницаемость их позволяет изготавливать малогабаритные конденсаторы большой емкости. Зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности поля дает возможность создавать конденсаторы, емкость которых зависит от напряженности поля. Они нашли широкое применение в низкочастотных усилителях и в других радиотехнических устройствах.

В 1880 году братья Жак и Пьер Кюри открыли пьезоэлектрический эффект. Суть его в следующем: при деформации некоторых кристаллов (кварц, турмалин, сегнетова соль и др.) на их гранях появляются поляризационные заряды. Если внешняя сила изменяет направление, то изменяется знак поляризации. Имеет место и обратный эффект. Если пьезоэлектрик поместить в электрическое поле, то его геометрические размеры начинают изменяться. Если поле переменное, то кристалл начинает совершать колебания. В окружающей среде возникают волны. Таким образом получают ультразвуковые колебания, нашедшие широкое применение. Пьезоэлементы применяются для измерения напряженности в отдельных частях машин, зданий; в медицине – прослушивание шумов в сердце; в электрофонах для воспроизведения грамзаписи.

Магнитные свойства вещества. Магнетизм – универсальное свойство, присущее всем веществам. Оно проявляется во взаимодействии электрических токов, электрических токов и магнитов (тел, обладающих магнитным моментом), магнитов друг с другом. Это взаимодействие осуществляется магнитным полем и обусловлено магнетизмом микрочастиц. Различают электронный и ядерный магнетизм. В свою очередь, они делятся на орбитальный и спиновый. Второй (т.е. спиновый) обусловлен собственным механическим моментом ядра и электронов – спином, первый (т.е. орбитальный) – орбитальным механическим моментом (движением электронов и ядер в оболочках атома).

Магнитные моменты микрочастиц (электронов, атомных ядер) образуют магнитные моменты атомов и молекул, а они, взаимодействуя между собой, определяют магнитные свойства вещества. Магнитные свойства присущи всем веществам в большей или меньшей степени (сильномагнитные вещества и слабомагнитные).

Вещества, обладающие магнитными свойствами, получили название магнетиков. Земля, Солнце, звезды являются магнетиками. Можно выделить два класса магнетиков по их поведению во внешнем магнитном поле. Если относительная магнитная восприимчивость $\mu < 1$, то такой класс магнетиков получил название диамагнетиков. У парамагнетиков относительная магнитная восприимчивость $\mu > 1$.

Диа- и парамагнитный эффекты можно объяснить поведением замкнутых круговых токов, вызванных движением электронов в атомах, во внешнем магнитном поле. У диамагнетиков в отсутствие внешнего поля орбитальные магнитные моменты скомпенсированы, поэтому атом не создает магнитного поля. Например, в атомах инертного газа (гелий) электроны вращаются вокруг ядра и собственной оси так, что их орбитальные моменты равны и противоположно наведены.

Суммарный магнитный момент атома равен нулю. Под действием внешнего магнитного поля электронные орбиты, эквивалентные круговым токам, получают добавочную энергию и угловую скорость, с которой они начинают прецессировать вокруг силовых линий внешнего поля. Прецессионное движение орбит соответствует электрическому току, он создает собственное магнитное поле, которое направлено, согласно правилу Ленца, противоположно внешнему.

Из приведенных рассуждений видно, что диамагнетизм обусловлен явлением электромагнитной индукции молекулярных токов во внешнем магнитном поле. К диамагнетикам относятся: золото, серебро, медь, цинк, висмут, ртуть, вода, углекислый газ, гелий.

Если спиновый, или орбитальный, или оба магнитных момента атома отличны от нуля, то во внешнем магнитном поле собственный магнитный момент атома ориентируется по полю, усиливая его. В отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты парамагнетиков ориентированы хаотично вследствие их

теплового движения. К парамагнетикам относятся: редкоземельные элементы, платина, алюминий, окись азота, кислород и др.

Поскольку парамагнетик усиливает внешнее поле, то в неоднородном магнитном поле он будет втягиваться, диамагнетик этим полем будет выталкиваться. Магнитные проницаемости у диа- и парамагнетиков не очень отличаются от единицы, поэтому диа- и парамагнитный эффекты незначительны. Характерной особенностью этих веществ является то, что μ не зависит от внешнего поля, поэтому индукция результирующего поля находится в линейной зависимости от индукции внешнего ($B = \mu B_0$ или $B = \mu H$).

Класс веществ, для которых $\mu \gg 1$, получил название ферромагнетиков. Эти вещества усиливают внешнее поле в сотни, тысячи раз, они по своим свойствам очень напоминают сегнетоэлектрики. В них за счет взаимодействия элементарных магнитных моментов возникают энергетически выгодные самопроизвольные намагниченные области – домены. Линейные размеры их $10^{-1} - 10^{-4}$ мм. В каждом домене некомпенсированные магнитные моменты атомов расположены в одном направлении. В отсутствие внешнего поля магнитные моменты доменов расположены хаотично, в целом результирующее поле будет равно нулю. С увеличением внешнего магнитного поля все большее число доменов медленно (из-за магнитного трения) выстраивается вдоль поля. При определенном значении внешнего поля все домены располагаются вдоль него, наступает явление магнитного насыщения ферромагнетика. При устранении внешнего поля у ферромагнетиков при наличии магнитного трения возникает остаточная намагниченность.

Экспериментальные исследования установили интересный факт. Ферромагнитные свойства вещества проявляются только в кристаллическом состоянии. Стоит вещество перевести в жидкое или газообразное состояние, как оно становится парамагнетиком. Ферромагнитные свойства проявляет железо, никель, кобальт,

гадолиний. Природа ферромагнетизма сложнее, чем у диа- и парамагнетизма. Объяснить ее на основе классической физики невозможно, только квантовая механика смогла раскрыть механизм этого интересного явления. Если у последних магнитный момент атома определяется только орбитальным моментом электронов, то у ферромагнетиков приходится принимать во внимание взаимодействие орбитальных и спиновых магнитных моментов электронов.

Магнитные свойства вещества находят широкое применение в электротехнике, приборостроении, электронных счетно-решающих устройствах, морской и космической навигации, геофизических методах разведки полезных ископаемых, автоматике и телемеханике. Из ферромагнитных материалов изготавливают магнитопроводы генераторов, моторов, трансформаторов, реле, магнитных усилителей, элементы магнитной памяти, стрелки компасов, ленты магнитной звукозаписи. Магнитные вещества широко используются в науке и технике как средство изучения структуры различных тел, химических связей и структуры молекул. Большое распространение получили магнитные методы контроля.

Оптические свойства вещества. При взаимодействии света с веществом как свет, так и вещество претерпевают существенные изменения. Влияние вещества на свет можно описать с помощью диэлектрической проницаемости (ϵ), которая зависит от показателей преломления, поглощения среды. Рассмотрим некоторые явления, в которых это взаимодействие проявляется особенно значительно.

Дисперсия и поглощение света. Д.К. Максвелл, развивая теорию электромагнитного поля, доказал, что скорость электромагнитных волн в среде зависит от электрических и магнитных свойств среды: $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$. Коэффициент, зависящий от

свойств среды, получил название показателя преломления данной среды, он численно равен $n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon\mu}$ и показывает, во сколько раз скорость света в вакууме больше, чем в среде. Если принять во внимание, что диэлектрики имеют $\mu = 1$, то $n = \sqrt{\epsilon}$. Эксперименты показали, что в прозрачных средах (стекло, вода, сероуглерод) скорость света возрастает с ростом длины волны. Явление зависимости скорости света (показателя преломления среды) от длины волны получило название дисперсии света.

Если в такую прозрачную среду попадут электромагнитные волны видимого диапазона волн (белый свет), то он распадется на ряд монохроматических – от красного до фиолетового цвета. Красные световые лучи имеют самую большую скорость, фиолетовые – самую маленькую. Первые проходят меньший путь в среде, чем вторые лучи. Чем больший путь пройдет свет в среде, чем больше ее дисперсия, тем сильнее отстают друг от друга различные цветные лучи. Очевидно, разложение белого света является следствием разной скорости распространения в среде электромагнитных волн различной частоты (длины волны), а значит, разного показателя преломления среды для этих волн.

Различают нормальную и аномальную дисперсии. В средах с нормальной дисперсией скорость света возрастает с возрастанием длины волны. При аномальной дисперсии скорость света убывает с ростом длины световой волны. В среде световые лучи меньшей длины волны будут проходить больший путь. Рассмотрим причину дисперсии света в разных средах.

Электромагнитные волны (свет), проходя через вещество, приводят в колебательное движение частицы вещества (электроны, ядра атомов). Энергии световой волны будет достаточно для того, чтобы привести в колебательное движение электроны. Ядра атомов практически не реагируют на световую волну. В

среде, перпендикулярной световой волне (лучу), происходит смещение легких электронов, возникают токи смещения, за счет которых вещество поляризуется.

Смещение заряженных частиц приводит к появлению вторичных волн, они складываются с исходной световой волной. Вследствие инерции электронов вторичные волны запаздывают по времени от основной, поэтому при сложении волн результирующая волна отстает по фазе от основной. Чем короче волна, тем отставание по фазе результирующей волны будет больше, а скорость ее будет меньше.

Нет таких веществ, которые не поглощали бы электромагнитные волны. Стекло, например, сильно поглощает ультрафиолетовые и инфракрасные волны, вода – инфракрасные, кварц и каменная соль – короткие ультрафиолетовые и длинные инфракрасные. Все вещества, которые поглощают электромагнитные волны за пределами их видимого диапазона, получили название прозрачных, или бесцветных. Если волны поглощения находятся в видимой части спектра, то в этом случае получаем окрашенные среды (цветные стекла, окрашенные растворы, драгоценные камни). В таких средах происходит избирательное поглощение, при этом только некоторые лучи проходят, остальные поглощаются или ослабевают.

Такое поглощение является одной из причин окраски тел. Например, белый цвет проходит через среду, прозрачную для лучей синей части спектра (от зеленого до фиолетового), все остальные лучи средой поглощаются. Тогда свет, прошедший через среду, окажется синим. Оттенок цвета будет зависеть от того, свет какой длины волны и в какой пропорции прошел через среду. Стало быть, цвет окрашенных тел определяется цветом (длиной волны) лучей, не поглощенных средой. Если тело поглощает все лучи, на него падающие, при этом не пропуская и не отражая никаких волн, то такое тело называется абсолютно черным.

Окраска тел (особенно непрозрачных) нередко определяется не только избирательным поглощением, но и избирательным отражением. Эта окраска носит название металлической, или поверхностной. Например, золото обладает желтой «поверхностной» окраской, лучи, дополнительные к этому цвету, – зеленые. Поэтому такая тонкая металлическая фольга в проходящем свете видна зеленой.

Механизм поглощения можно объяснить, оперируя закономерностями классической физики. Если собственная частота колебания частиц вещества (электронов, ионов, атомов) близка (в лучшем случае совпадает) с частотой падающей электромагнитной волны, то энергия этой световой волны поглощается частицами вещества, превращаясь в тепловую энергию полностью или частично.

Отражение и давление света. Электромагнитные волны, которые не пропускаются и не поглощаются веществом, испытывают отражение. Различают зеркальное и рассеянное отражение. Если поверхность идеально полированная, то имеет место зеркальное отражение. В случае матовой поверхности лучи отражаются во все стороны – рассеянное отражение. Часто мы имеем дело с такими поверхностями, которые частично отражают, часть лучей рассеивают.

Электромагнитная волна, падая на поверхность вещества, оказывает на него давление. Рассмотрим природу этого явления подробно. Колебания вектора напряженности электрического и магнитного поля перпендикулярны друг другу, а также перпендикулярны направлению распространения светового луча. Электрическая составляющая электромагнитной волны вызовет смещение заряженных частиц вещества (ток смещения). На движущиеся заряженные частицы со стороны магнитного поля будет действовать сила Лоренца, направление которой совпадает с направлением светового луча. Она и создает дополнительное световое давление.

Свет, взаимодействуя с веществом, отражается, преломляется, интерферирует, дифрагирует, поляризуется. Законы лучевой и волновой оптики описывают эти явления на основе принципа Гюйгенса.

Выводы. Столетние усилия большого числа ученых привели к созданию классической электронной теории вещества. Как было показано, она смогла объяснить многие явления, экспериментально установленные закономерности, определить границы их применения. Например, закон Ома выполним в области слабых электрических полей; законы Джоуля–Ленца и Видемана–Франца – в области высоких температур; эффект Холла – для большого числа металлов.

Вместе с тем, в классической теории остались открытыми (нерешенными) такие вопросы: температурная зависимость электрического сопротивления металлов; нарушение закона Видемана–Франца в области низких температур; положительный «аномальный» знак постоянной Холла для ряда металлов; нарушение закона Дюлонга и Пти в области низких температур. Уже в начале XX века стало ясно, что классическое описание свойств вещества, основанное на представлениях об идеальном газе невзаимодействующих частиц и статистике Максвелла–Больцмана, страдает большими недостатками.

Возникшие противоречия и несоответствия смогла разрешить квантовая электронная теория вещества. Она основывалась на представлениях о возможных состояниях электрона в квантовой системе, волновых свойствах вещества, статистике Ферми–Дирака, принципе Паули. Квантовая теория объяснила:

- наблюдаемую на опыте температурную зависимость сопротивления металлов как в области высоких температур, так и в области низких;

- отклонения от законов Видемана–Франца, Дюлонга и Пти в области низких температур;

- положительный знак постоянной Холла на основе учета двух типов носителей заряда: электронов и дырок.

ОБОБЩЕНИЕ И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ В ТАБЛИЦАХ, СХЕМАХ И РИСУНКАХ

Таблица 11

Классическая электронная теория вещества

Основание		
Факты	Идеализированный объект теории	Понятия, физические величины
Исследования: С. Грея, Б. Франклина, Т. Эпинуса, О. Кулона, Г. Дэви, М. Фарадея, С. Аррениуса, Д.К. Максвелла, В. Вебера, Г.Д. Стонея, Э. Холла, Л. Больцмана, Д.Д. Томсона, Р. Милликена, А.Ф. Иоффе, Л.И. Мандельштам и Н.Д. Папалекси, Р. Толмена и Б. Стюарта, К.В. Рикке, Г.С. Ома, Д. Джоуля, Э. Ленца, Г.Г. Видемана, Р. Франца, А. Вольта	Модель электрона (иона), модель твердого тела (атома)	Сила тока, плотность тока, подвижность, сопротивление, удельная электропроводность, сторонние силы, электродвижущая сила
Ядро		
Принципы	Законы и уравнения теории	
Статистики: 1. Все направления теплового движения заряженных частиц равновероятны 2. Средняя кинетическая энергия теплового движения электронов пропорциональна абсолютной температуре	$\vec{j}_m = n_0 q_e \vec{v}; I = n_0 q_e v S$ $\vec{j} = \sigma \vec{E}; I = \frac{\Delta \varphi}{R}$ $\vec{j}_ж = \frac{F}{N_A} z_+ n_0 (u_+ + u_-) \vec{E}$ $\vec{j}_r = q_e n_0 \vec{v} (u_+ + u_-) \vec{E}$ $\vec{j}_{n/n} = E \vec{q}_e (nu_n + pu_n)$	
Следствие		
Объяснение законов, свойств веществ, явлений, принципов		
1. Закон Ома 2. Закон Джоуля–Ленца 3. Закон Видемана–Франца 4. Закон Вольта 5. Эффект Холла	6. Расчет электрических цепей постоянного тока 7. Некоторые процессы в цепях переменного тока 8. Термоэлектрические эмиссионные явления 9. Магнитные, электрические и оптические свойства вещества	

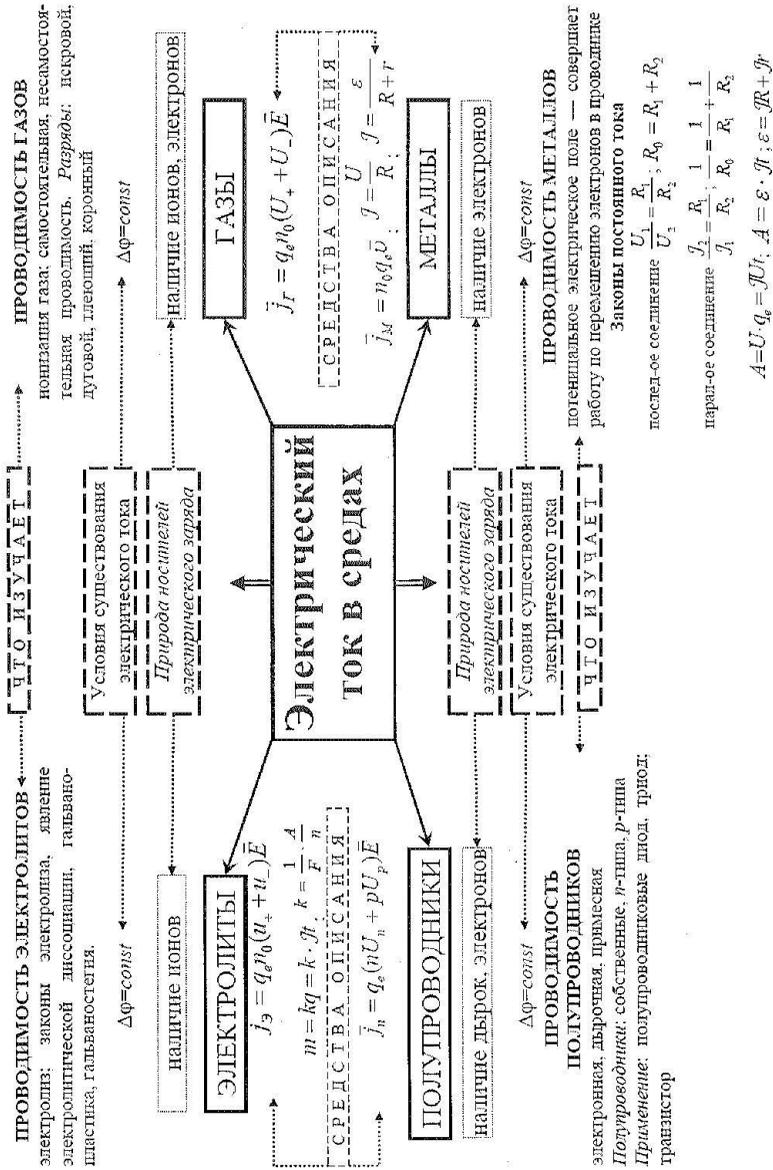


Рис. 4.7. Структурно-логическая схема «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В СРЕДАХ»

**Классификация исторических опытов, составляющих базис
электронной теории вещества**

Теоретическое основание	Экспериментальный факт
ОСНОВАНИЕ	
Спор о существовании элементарного заряда: Дж. Дж. Томсон (частица вещества, от которой тянется трубка индукции) Г.А. Лоренц (модификация в эфире с непрерывно распределённой плотностью заряда), К.В. Рикке и В. Гизе (ионы, структурные элементы молекул) – Дж. Стоней, Д.К. Максвелл, Г. Гельмгольц (делимость электричества на элементарные порции) – конец XIX века Изучение природы электромагнитного взаимодействия	Дж. Дж. Томсон – открытие электрона, определение удельного заряда (1897) Р. Милликен – измерение элементарного заряда (1909)
ЯДРО	
Теория П. Друде – Г. Лоренца (1900–1905) Исследование проводимости металлов	Р. Толмен и С. Стьюарт – открытие явления инерции электронов в металлах (1916) М. Фарадей – установление законов электролиза (1833)
Исследование проводимости жидкостей Исследование проводимости газов Исследование проводимости полупроводников	И. Гитторф – экспериментальное доказательство существования ионов (1853) Дж. Дж. Томсон, Дж. Таунсенд – установление природы носителей тока в газах (1896) К. Вагнер – обнаружение существования электронной и дырочной проводимости у полупроводников (1930)

Теоретическое основание	Экспериментальный факт
СЛЕДСТВИЕ	
<p>Накопившиеся экспериментальные факты, которые объяснялись точки зрения различных гипотез (флюидов, жидкостей и др.), и нашедшие единообразное объяснения теорией Друде–Лоренца</p>	<p>Ф. Эпинус – открытие явления электризации турмалина при нагревании (1703) Ш. Дюфе – открытие двух видов электричества (1733) Б. Франклин – изобретение молниеотвода (1750) Л. Гальвани – открытие электрического тока (1786) С. Грей – открытие явления электро-проводности (1729) А. Вольта – создание первого источника постоянного тока «вольтова столба» (1799) Г. Дэви – установление зависимости сопротивления проводника от его длины и поперечного сечения (1821) Г. Ом – установление закона электрической цепи (1826) Дж. Джоуль и Х. Ленц – установление закона теплового действия тока (1842)</p>

Задачи и упражнения

4.1. Два металлических шарика радиусов r и R находятся один от другого на расстоянии, значительно большем их радиусов. Шарика несут одинаковые электрические заряды. Каковы будут заряды, если их соединить проволокой?

4.2. Можно ли две лампочки накаливания мощностью 60 и 40 Вт, рассчитанные на напряжение 110 В, включить в цепь с напряжением 220 В при их последовательном соединении?

4.3. По медному проводнику сечением 1 мм^2 протекает ток силой 10 А. Определить среднюю скорость упорядоченного движения электронов вдоль проводника, если считать, что на каждый атом меди приходится один электрон проводимости.

4.4. Электрический ток в металлических проводниках представляет собой движение свободных электронов, сталкивающихся с ионами кристаллической решетки и отдающих им импульс, который они приобрели до соударения. Почему же тогда металлический проводник, по которому идет ток, не испытывает никаких механических воздействий, в направлении движения электронов?

4.5. Найти сопротивление трубки длиной $l = 84 \text{ см}$ и площадью поперечного сечения $S = 5 \text{ мм}^2$, если она наполнена воздухом так, что в 1 см^3 находится при равновесии 107 пар одновалентных ионов с проводимостью $\mu_+ = 1,3 \cdot 10^{24} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и $\mu_- = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

4.6. Какое количество электроэнергии расходуется на получение 1 кг алюминия, если электролиз ведется при напряжении 10 В, коэффициент полезного действия всей установки 80%. Атомная масса алюминия 27.

4.7. Элемент замыкается проволокой один раз с сопротивлением $R_1 = 4 \text{ Ом}$, другой раз с сопротивлением $R_2 = 9 \text{ Ом}$. В том и другом случае количество теплоты, выделяющееся в проволоках за одно и то же время, одинаково. Каково внутреннее сопротивление элемента?

4.8. Понижающий трансформатор с коэффициентом трансформации 12 включен в сеть с напряжением 120 В. Вторичная катушка трансформатора присоединена к прибору, через который идет ток силой 2 А. Определить сопротивление прибора, если сопротивление вторичной катушки трансформатора равно 1 Ом. Потерями энергии в трансформаторе пренебречь.

4.9. Две лампы с сопротивлениями при полном накале r и R , причем $R > r$, последовательно включают в осветительную сеть. Которая из ламп светит ярче? В обеих лампах вольфрамовые нити.

4.10. Трамвайная линия питается постоянным током, причем воздушный провод присоединен к положительному полюсу динамомашин, а рельсы – к отрицательному. Почему не наоборот?

ЧАСТЬ V. СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Классические представления о пространстве и времени.

Любые физические процессы происходят в пространстве и во времени. Физическая теория пространства и времени, которая раскрывает эти свойства и проявление их в инерциальных системах отсчета (ИСО), получила название специальной теории относительности (СТО).

В конце XIX столетия в физике возникли серьезные трудности. Они были связаны с механическими воззрениями на электромагнитные явления. Считалось, что для распространения электромагнитных волн (как и в случае механических) нужна среда – эфир. Эфир представляли в виде невидимого и невесомого желе, возмущение в котором передается от одной точки к другой. Но если в обычном желе существуют соприкасающиеся частицы (они и передают эти возмущения), то в эфире таких частиц нет, он не является материальным.

Сложившиеся к этому времени механические представления на природу электромагнитных явлений, построенные на теории эфира, привели к новым трудностям. Три различных эксперимента завели ученых в окончательный тупик, потому что выводы из опытов оказались противоречивыми:

1. Эфир увлекается движущейся Землей, стало быть, все лабораторные установки, на которых проводятся опыты, покоятся относительно эфира (выводы из опытов Майкельсона и Морли).

2. Земля свободно движется сквозь эфир, который покоится относительно покоящихся звезд (опыты Физо).

3. Движущаяся материальная среда, например, вода, в которой распространяется свет, увлекает за собой эфир, но уже со скоростью, равной половине скорости среды.

Эти противоречивые выводы привели теорию эфира к краху. В 1905 году А. Эйнштейн (1879–1955) выдвинул новую смелую идею. Вымышленные представления о мировом эфире он отбрасывает, заменяя их двумя постулатами. На основе этих постулатов он строит новую теорию, которая перебрала мостик между механикой и электромагнетизмом.

Теория А. Эйнштейна потребовала отказаться от сложившихся ранее взглядов на пространство и время. Долгое время считали, что свойства пространства и времени выражены в представлениях геометрии Евклида и механики Ньютона. Согласно их представлениям, пространство – это пустое «вместилище» тел, абсолютно неподвижное, обладающее определенными размерами; оно однородное и изотропное. Время – «вместилище» событий, равномерно текущих от прошлого к будущему. Пространство и время – абсолютная система отсчета.

Впервые по-новому вопрос о свойствах пространства был поставлен в связи с разработкой неевклидовой геометрии. Одним из первых, кто внес определенный вклад в разработку новой геометрии, был Гаусс (начало XIX века). В 1929 году Н.И. Лобачевский (1792–1851) «строит» геометрию, отличную от Евклидовой, в ней свойства пространства определяются свойствами материи и ее движением. Спустя 25 лет вслед за Лобачевским Риман высказывает идею о возможности геометрии, отличной от Евклидовой. По мнению Лобачевского и Римана, ответить на вопрос, каким является физическое пространство, должен опыт. Особенности различных геометрий Евклида, Римана и Лобачевского удобно представить наглядно, сравнив основные пространственные характеристики этих геометрий: вид поверхности, сумму углов треугольника, кривизну поверхности (таблица 13).

Под кривизной поверхности подразумевается отступление метрики от евклидовой. Разницу суммы углов треугольника от 180 назвали дефектом треугольника.

Таблица 13

Эпоха	Автор геометрии	Вид поверхности	Сумма углов треугольника	Знак кривизны	Дефект треугольника
До новой эры	Евклид	Плоскость Кратчайшая линия – прямая	180°	$K=0$	$A=0$
Начало XIX в.	Лобачевский	Псевдосфера	$>180^\circ$	$K<0$	$A<0$
Середина XIX в.	Риман	Сфера Кратчайшая линия – отрезок дуги большого круга	$<180^\circ$	$K>0$	$A>0$

Следует заметить, что первоначально появление неевклидовой геометрии, а затем неевклидовой механики не затронули физику. Впервые А. Эйнштейн на основании принципа эквивалентности доказывает возможность существования неевклидовой метрики пространства. В мысленном эксперименте с лифтом, покоящимся в отсутствии гравитационного поля, луч света входит через малое отверстие лифта и попадает на его противоположную стенку. Луч света в данных условиях – прямая. Лифт сместился вверх, а луч – вниз. Траектория светового луча искривляется. Но в соответствии с принципом эквивалентности ускоренное движение лифта равнозначно полю тяготения, а это значит, что любые линии в реальном пространстве тоже неевклидовы. С точки зрения Эйнштейна, мы живем не в трехмерном, а в четырехмерном пространстве, в нем пространственные и временные координаты неразрывно связаны друг с другом и образуют единый континуум «пространство–время».

Пространство-время – идеализированный объект специальной теории относительности. Ньютонская концепция пространства и времени сформировалась на идее дальнего дейст-

вия – бесконечно быстрого сигнала. С развитием электромагнитного поля Д.К. Максвелла утвердился принцип близкодействия – представления об электромагнитном поле как о материальном носителе этого взаимодействия. Несостоятельность ньютоновских представлений о пространстве и времени обнаружена в связи с разработкой специальной теории относительности. Согласно этой теории, расстояние между точками пространства (место событий) и промежутки времени между ними – величины относительные, их значения различны в разных системах отсчета, движущихся относительно друг друга. Пространственно-временные величины относятся только к материальным объектам и процессам и не существуют независимо от них. Пространственно-временные величины изменяются согласованно при переходе от одной системы отсчета к другой. Эти представления привели к новому понятию – «пространство-время».

Пространство-время, по мнению философов, это общая форма координации материальных объектов, их состояний. Пространство – такая форма координации материальных объектов, которая выражает их расположение относительно друг друга, их протяженность и ориентацию. Время – это форма координации сменяющих друг друга состояний (явлений) – их последовательность и длительность. Методологическую основу понятия «пространство-время» составляют следующие положения:

- пространство-время – объективная реальность;
- единство пространства-времени, материи и движения;
- изменчивость и относительность пространства–времени;
- симметрия пространства-времени;
- дискретность пространства-времени.

Среди свойств этого понятия целесообразно выделить:

- относительность длины, времени;
- относительность одновременности;

- связи пространственно-временных характеристик материальных объектов (преобразования Лоренца);
- зависимость метрики пространства-времени от концентрации массы (выводы общей теории относительности);
- однородность времени;
- изотропность и однородность пространства.

Рассмотрим некоторые из выделенных свойств идеализированного объекта теории относительности – «пространство-время».

Опыт Майкельсона. Основание СТО, как уже отмечалось, составляют факты других наук: философии и математики. Экспериментальный базис теории составляет опыт Майкельсона, осуществленный в 1881 году. В задачу эксперимента входило изучение влияния движения Земли на скорость света. Согласно гипотезе неподвижного эфира предполагалось обнаружить и исследовать наличие «эфирного ветра». Скорость «ветра» по отношению к Земле должна быть $(c + v)$ или $(c - v)$ в зависимости от направления луча света против или по направлению движения Земли (c – скорость света в эфире; v – орбитальная скорость Земли). Опыт осуществлялся с помощью интерферометра Майкельсона.

Он состоял из источника света S , полупрозрачной пластинки Π , расположенной под углом 45° к лучу, двух зеркал A и B , расположенных во взаимно-перпендикулярных плоскостях экрана – K (рис. 5.1). PB и PA – плечи интерферометра, в опыте Майкельсона они равны. Свет от источника S отражается от полупрозрачной пластинки Π и идет к зеркалу A . Часть лучей проходит сквозь пластинку Π и попадает на зеркало B . Отраженные лучи от зеркала A и B возвращаются к полупрозрачной пластинке Π , проходят, отражаются от нее и попадают на экран K . Оба отраженных луча когерентны, поэтому на экране при их сложении получится интерференционная картина. Если во взаимно перпендикулярных направлениях свет идет с разными скоростями, то

при повороте всего прибора на 90° лучи А и В поменяются местами, разность хода между ними изменится. Это должно неизбежно привести к смещению интерференционной картины. Следует отметить, что движение Земли на небольшом участке траектории можно считать равномерным и прямолинейным, поэтому системы отсчета, связанные с Землей и Солнцем, будем считать инерциальными.

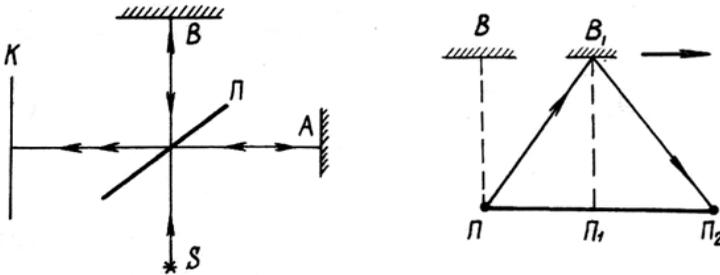


Рис. 5.1

Для наблюдателя, находящегося на Земле, в случае равных плеч интерферометра ПА и ПВ время прохождения светом расстояний ПАП и ПВП одинаково. Рассмотрим этот процесс относительно наблюдателя, находящегося на Солнце. Пусть Земля движется со скоростью $v = 30$ км/с вдоль плеча ПА интерферометра, тогда время движения света от П к А $t_{ПА} = \frac{ПА}{c-v}$, а от А к П $t_{АП} = \frac{АП}{c+v}$, тогда полное время движения света от П к А и обратно составит:

$$t_1 = t_{ПА} + t_{АП} = \frac{2ПА \cdot c}{c^2 - v^2}.$$

Для наблюдателя на Солнце луч света от П к К пройдет расстояние $ПВ_1П_2$ (рис. 5.2). Пока луч идет от пластинки к зеркалу, интерферометр сместится на расстояние $ПП_1$ со скоростью v . При движении света обратно луч смещается в положение $П_2$. Полный путь, пройденный лучом:

$$ПВ = В_1П_1 = \sqrt{(ПВ_1^2) - (ПП_1)^2}.$$

Пусть время движения светового луча от пластинки к зеркалу и обратно t_2 , тогда расстояние $ПВ_1 = c \frac{t_2}{2}$; а $ПП_1 = v \frac{t_2}{2}$;

$$ПВ = П_1В_1 = \sqrt{\frac{c^2 t_2^2}{4} - \frac{v^2 t_2^2}{4}} = \frac{t_2}{2} \sqrt{c^2 - v^2}; \quad t_2 = \frac{2ПВ}{\sqrt{c^2 - v^2}}. \quad (5.2)$$

Таким образом, сравнив выражения (5.1) и (5.2), видим, что время прохождения лучом света равных плеч интерферометра для наблюдателя на Земле и на Солнце оказалось разным.

Если повернуть интерферометр на 90° , то его плечи ПА и ПВ поменяются местами, полученные выражения для t_1 и t_2 поменяются тоже, что должно вызвать на экране изменение интерференционной картины в системе отсчета, связанной с Солнцем. Согласно принципу относительности, должно наблюдаться смещение интерференционной картины и в системе, связанной с Землей.

Опыт Майкельсона дал отрицательный результат: при повороте интерферометра в системе отсчета, связанной с Землей, изменения интерференционной картины на экране не наблюдалось. Согласно принципу относительности в системе отсчета, связанной с Солнцем, смещения интерференционной картины тоже не должно быть. Результаты эксперимента можно объяснить, если предположить, что промежутки времени t_1 и t_2 одинаковы, несмотря на различные математические выражения. Отрицательный результат опыта Майкельсона позволил сделать очень важный вывод. Предположение о том, что скорости света различны в направлениях ПАП и ПВП в разных инерциальных системах отсчета, неверно.

Относительность длины и времени. Относительность одновременности. *Относительность длины.* На основании опыта Майкельсона, как было показано выше, время t_1 равно времени t_2 , поэтому выражения 1 и 2 можно приравнять:

$$\frac{2ПА \cdot c}{c^2 - v^2} = \frac{2ПВ}{\sqrt{c^2 - v^2}}.$$

Сократив левую и правую часть выражения на 2 и умножив на $\frac{c^2-v^2}{c^2}$, получаем:

$$\text{ПА} = \text{ПВ} \sqrt{\frac{c^2-v^2}{c^2}} = \text{ПВ} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (5.3)$$

Соотношение (5.3) позволяет сделать вывод о том, что в системе отсчета, связанной с Солнцем, плечо ПА в направлении движения интерферометра короче плеча ПВ, перпендикулярного к направлению движения интерферометра. Между тем эти плечи в системе отсчета, связанной с Землей, как показывают измерения, одинаковы. В системе отсчета, связанной, например, с другой планетой, длина плеча ПА будет короче длины плеча ПВ в $\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}$, где v_1 – скорость движения Земли (интерферометра) относительно выбранной планеты.

Стало быть, никакой единой длины тела не существует, так же как не существует единого расстояния между любыми произвольными точками. Эти расстояния, как показали проведенные рассуждения, зависят от того, в какой системе отсчета они измеряются. Длина зависит от выбора системы отсчета, значит, она относительна.

Относительность времени. Пусть для наблюдателя, находящегося на Земле, время движения света от П к А и обратно равно $t = \frac{2\text{ПА}}{c}$. Для наблюдателя на Солнце $t' = \frac{2(\text{ПА})'c}{c^2-v^2}$. Как было показано, одна и та же длина ПА в разных системах отсчета разная; $(\text{ПА})' = \text{ПА} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$; $(\text{ПА})'$ – длина в движущейся системе отсчета. Подставив выражение для $(\text{ПА})'$ в формулу для времени t' , получим:

$$t' = \frac{2\text{ПА} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot c}{c^2 - v^2} = \frac{2\text{ПА}}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \text{ но } \frac{2\text{ПА}}{c} = t,$$

$$\text{тогда } t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (5.4)$$

Проведенные рассуждения позволяют сделать вывод: промежуток времени для солнечного наблюдателя оказался больше, чем для земного, т.е. при переходе в движущуюся инерциальную систему отсчета из покоящейся время замедляется. Следовательно, время зависит от выбора системы отсчета, оно, как и длина, относительно. Течение времени зависит от состояния движения материальных объектов, поэтому эффект замедления времени относится не только к часам, но и к любым материальным процессам, в частности, к процессам физическим, химическим и биологическим, связанным со старением живого организма. Поэтому справедливо, в то же время «парадоксально» утверждение о том, что если один из двух родившихся близнецов отправится путешествовать с большой скоростью, то по возвращении он окажется моложе своего брата, оставшегося на Земле («парадокс о близнецах»).

Относительность одновременности. Повседневный опыт убеждает нас в том, что все события происходят упорядоченно во времени, что существует прошлое, настоящее и будущее. Мы без труда можем установить, являются рассматриваемые события одновременными или следуют один за другим, а может быть, одно событие предшествует другому? А.А. Эйнштейн доказал, что с точки зрения СТО невозможно четко разграничить события, происходящие в прошлом и будущем. События, происходящие в определенной последовательности, с точки зрения одного наблюдателя, могут совершаться в другой последовательности, с точки зрения другого наблюдателя, который движется относительно первого.

Для доказательства высказанного утверждения рассмотрим пример, описанный А. Эйнштейном. Два наблюдателя находятся один на перроне, другой – в поезде, движущемся с большой скоростью (рис. 5.2). Наблюдатель К на перроне видит два удара

молний в концы движущегося вагона в тот момент, когда с ним поравнялась середина вагона. Поскольку концы вагона от наблюдателя K находятся на равном расстоянии, то вспышки молнии до наблюдателя на перроне доходят одновременно. В середине вагона стоит наблюдатель K' . Он знает, что свет молний от концов вагона распространяется с одинаковой скоростью c , сам он движется вместе с вагоном со скоростью v к точке B . Поэтому вспышка света от точки B , по его мнению, приходит раньше, чем от точки A . Наблюдатель K' делает вывод, что вспышка молнии в точке B происходит раньше, чем в точке A . В результате два события, которые являются одновременными в системе, связанной с перроном, оказываются неодновременными в системе, связанной с поездом.

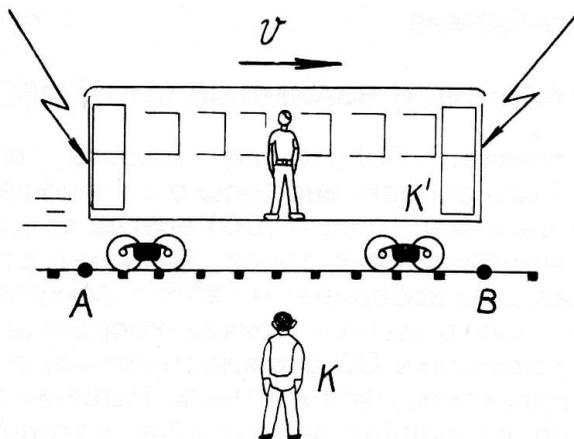


Рис. 5.2

Если наблюдатель увидел удар молнии в точке A немного позже, чем в точке B , то он делает вывод, что событию в точке A предшествовало событие в точке B . Наблюдатель K' в вагоне на основании описанных выше причин делает вывод о том, что свет

из точки В к нему приходит раньше, чем от точки А. Примечательно тот факт, что наблюдатель К на перроне не сможет сообщить наблюдателю К' в поезде о событии в точке А, которое для него произойдет в будущем, так как никакую информацию невозможно передать со скоростью, большей скорости света.

Рассмотренный пример убедительно свидетельствует о том, что последовательность событий во времени с точки зрения различных наблюдателей зависит от их относительной скорости. Но ни один из наблюдателей не сможет увидеть события в такой последовательности, при которой причина была бы после следствия (вспышка молнии после того, как сигнал этой вспышки будет воспринят наблюдателями К и К'). Следовательно, в теории относительности сохраняется причинность, т.е. соотношение причины и следствия.

Инерциальные и взаимные системы отсчета. Система отсчета. Положение любого материального объекта может быть определено только по отношению к другим телам, поэтому системы отсчета (СО) всегда связаны с некоторой системой материальных точек. Система отсчета – это совокупность системы координат и набора синхронизированных часов, размещенных в разных точках координатной системы. В классической механике СО отождествлялось с математическими, а время полагалось абсолютным. Наличие СО позволяет путем измерения координат движущейся материальной точки в различные моменты времени получить уравнения движения $x = x(t)$; $y = y(t)$; $z = z(t)$, или в векторной форме $\vec{r} = \vec{r}(t)$, где \vec{r} – радиус-вектор материальной точки (рис. 5.3). При решении задач в механике на движение материальной точки одновременно по отношению к двум (или более) системам отсчета (взаимными системами отсчета – ВСО) одну из таких систем отсчета будем называть основной (ее условно считают неподвижной), а другую, движущуюся относи-

тельно ее, – подвижной системой отсчета. Движение материальной точки относительно подвижной системы отсчета получило название относительного движения. Скорость материальной точки относительно подвижной системы отсчета называется относительной скоростью движения – u' . Движение всех точек подвижной системы отсчета относительно неподвижной называется переносным движением, а скорость, соответственно, переносной скоростью v . Движение материальной точки относительно неподвижной системы отсчета называется сложным или абсолютным, а скорость, соответственно, абсолютной скоростью движения – u . Зависимость между названными скоростями в классической механике имеет вид: $\vec{u} = \vec{u}_1 + \vec{v}$.

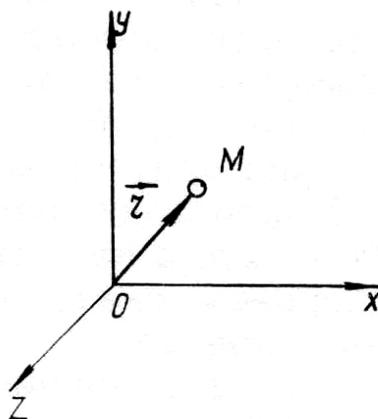


Рис. 5.3

Относительное движение может изучаться в произвольно выбранной системе отсчета. Наибольшими преимуществами обладают инерциальные системы отсчета (ИСО). В таких системах отсчета выполняется второй закон Ньютона. Как показывают опыты, инерциальной системой отсчета является гелиоцентрическая, начало ее жестко связано с Солнцем, а координаты направлены на какие-либо три удаленные звезды.

Классический принцип относительности Галилея утверждает, что любая СО, движущаяся по отношению к гелеоцентрической прямолинейно и равномерно, является также инерциальной. ИСО существует бесчисленное множество. Геоцентрическая СО жестко связана с Землей. Обращаясь вокруг собственной оси и Солнца, она движется ускоренно, а поэтому является неинерциальной. Это её свойство проявляется на опытах, связанных с появлением инерции: силы инерции отклонение падающих тел к Востоку, движение маятника Фуко и др. Вследствие малости этих эффектов геоцентрическую СО нередко считают инерциальной.

С точки зрения специальной теории относительности, взаимные системы отсчета – инерциальные, но в каждой из них своя метрика пространства, свои законы. Физические ИСО отличаются от математических. Все они движутся относительно друг друга, наряду с пространственными координатами включают еще одну – время. Специальная теория относительности устанавливает общие свойства ИСО, обусловленные свойствами пространства и времени. Выводы СТО, основанные на общих свойствах инерциальных систем отсчета, имеют характер универсальных законов. Специальную теорию относительности А. Эйнштейн строит на основе двух принципов-постулатов:

1. Все физические законы одинаковы во всех инерциальных системах отсчета. Первый принцип нередко называют принципом относительности. Суть его заключается в следующем. В любых инерциальных системах отсчета физические процессы: электрические, тепловые, оптические – протекают одинаково. Не имеет значения, какая из взаимных систем приводится в движение, каким образом приобретает относительное движение, все определяется только скоростью движения системы отсчета. Из первого принципа теории вытекают следствия:

1) равномерное прямолинейное движение физической системы отсчета не оказывает влияние на протекание в ней физических процессов. Они идут так же, как если бы эти системы покоились;

2) никакими опытами, проводимыми в инерциальной системе отсчета, нельзя получить информацию о том, движется данная система отсчета или покоится.

II. Скорость света (в пустоте) одинакова с точки зрения всех наблюдателей, независимо от движения источника относительно него.

Преобразования Лоренца. В механике неоднократно приходилось решать задачи, связанные с определением координат движущегося тела в различных инерциальных системах отсчета. Преобразования Галилея позволяли осуществлять переход из одной системы в другую. Пусть инерциальная система отсчета движется относительно другой со скоростью V вдоль оси X (в начальный момент времени оси координат систем отсчета O и O' совпадают) (рис. 5.4).

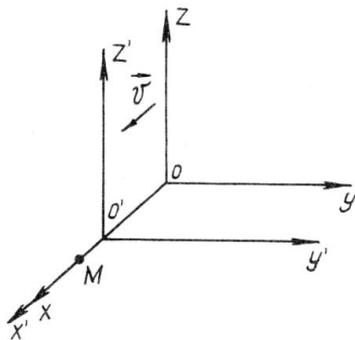


Рис. 5.4

Тогда в момент времени t точка O' будет иметь координату $x = vt$. Координаты материальной точки « M » в системе O : x, y, z , а в системе O' : x', y', z' . Если не учитывать зависимости длины и

течения времени от движения системы (классическая механика), то соотношения между координатами в системах O и O' описываются преобразованиями Галилея:

$$y' = y; \quad z' = z; \quad x' = x - vt; \quad t = t'.$$

Как будут выглядеть эти преобразования координат в теории относительности? Отрезок OM по отношению к неподвижной системе отсчета O движется со скоростью v , поэтому согласно выражению (5.3) в системе O отрезок OM имеет длину

$$x' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (5.5).$$

Если этот же отрезок измерить линейкой, неподвижной в системе O , то он окажется равным $x - vt$. Приравняем эти два выражения для длин одного и того же отрезка в одной и той же системе координат, получим $x - vt = x' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. Выразим x' из полученного соотношения

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (5.6)$$

Согласно принципу относительности можно считать, что система O движется со скоростью $(-v)$ относительно неподвижной системы $-O'$. Применив те же рассуждения, получим:

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (5.7)$$

Наблюдатели, сверив линейки в состоянии покоя, измеряют разные значения пройденного пути в системах отсчета O и O' . Сокращение длины в ИСО, движущейся относительно неподвижной со скоростью v , близкой к скорости света, вполне реальный эффект.

Найдем соотношения между t и t_1 , подставив выражение (5.6) в (5.7):

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad x - vt + vt' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = x \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right);$$

$$t' = \frac{vt - \frac{v^2}{c^2}x}{v \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{t - \frac{xv}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (5.8)$$

или

$$t = \frac{t' + \frac{x'v}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (5.9)$$

Последнее выражение можно получить, решая (5.7) и (5.6). Заметим, что пространственные координаты в направлениях, перпендикулярных относительному движению обеих систем отсчета, остаются одними и теми же $y' = y$; $z' = z$. Полученные соотношения (5.6), (5.7), (5.8), (5.9), характеризующие связи между координатами и временем в разных инерциальных (движущихся относительно друг друга) системах, носят название *преобразований Лоренца*.

Следствие специальной теории относительности. Значение специальной теории относительности трудно оценить. Выводы ее казались настолько парадоксальными в рамках существующей механики Ньютона, что долгое время вызывали научные дискуссии, недоумения, восхищения. Дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования подтвердили постулаты и выводы СТО. Рассмотрим некоторые из них.

Релятивистский закон сложения скоростей. Пусть материальная точка М движется вдоль оси ОХ со скоростью $u = \frac{x}{t}$. Скорость движения точки М относительно оси О'Х': $u' = \frac{x'}{t'}$, (рис. 5.5). Учитывая, что $x = x' + vt$, а $t' = t$, получим

$$u = \frac{x' + vt'}{t'} = u' + v. \quad (5.10)$$

Соотношение (5.10) носит название *классического закона сложения скоростей* (отметим, что скорости являются векторами, здесь и далее).

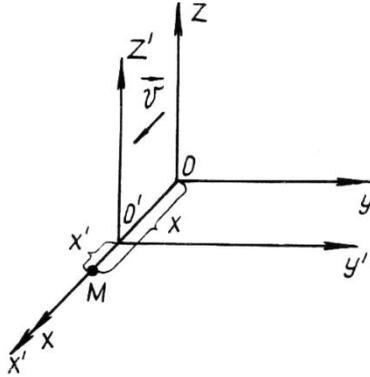


Рис. 5.5

В теории относительности x и t измерены в движущейся системе отсчета и определяются выражением:

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad t = \frac{t' + \frac{x'v}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Подставляя значения x и t в формулу $u = \frac{x}{t}$, получим:

$$u = \frac{x' + vt'}{t' + \frac{x'v}{c^2}} = \frac{\frac{x'}{t'} + v}{1 + \frac{x'}{t'} \cdot \frac{v}{c^2}} = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}. \quad (5.11)$$

Соотношение (5.11) носит название *релятивистского закона сложения скоростей*.

Применим полученный закон к конкретным ситуациям.

1. Пусть скорость света в системе $O' - C(u = c)$. Вычислим скорость света в системе отсчета O .

$$u = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = \frac{c + v}{1 + \frac{v}{c}} = \frac{c + v}{c + v} \cdot c = c.$$

Вывод. Скорость света в пустоте относительно всех инерциальных систем отсчета одинакова и равна c .

2. Пусть $u' = v = 0,5c$, тогда

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}} = \frac{0,5c + 0,5c}{1 + \frac{0,5c \cdot 0,5c}{c^2}} = \frac{c}{\frac{c^2 + 0,5c^2}{c^2}} = \frac{c}{1,25} = 0,8c.$$

Вывод. При сложении скоростей, каждая из которых равна половине c , получим сумму, меньшую c .

3. Пусть $u' = c; v = c$. Тогда получим:

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}} = \frac{c + c}{1 + \frac{c \cdot c}{c^2}} = \frac{2c}{2c^2/c^2} = c.$$

Вывод. Складывая скорости движения материальной точки и самой системы отсчета, движущихся со скоростями, равными скорости света, получаем общую скорость, равную c . Таким образом, какие бы две скорости мы ни складывали, нельзя получить результат, превышающий скорость света в вакууме. Рассмотренные примеры наглядно подтверждают второй постулат теории относительности. Если скорость движения материального объекта будет много меньше скорости света ($v \ll c$), тогда $\frac{u'v}{c^2} \rightarrow 0$; соотношение $\frac{u'+v}{1+\frac{u'v}{c^2}}$ примет вид: $u' + v$. В этом случае

можно говорить о преимуществах закона сложения скоростей в классической и релятивистской механике.

В 1955 году А.М. Бонч-Бруевич проверил экспериментально справедливость второго принципа А. Эйнштейна. Он измерил скорости света, пришедшего с диаметрально противоположных концов солнечного диска А и В (рис. 5.6). Принимая во внимание, что линейная скорость точек на ободу составляет 2 км/с, предполагалось, что свет, пришедший к наблюдателю на Земле от точки А солнечного диска, должен иметь скорость $-(c + v)$, от точки В $-(c - v)$. Измерения показали, что скорости света от точек А и В оказались равными.

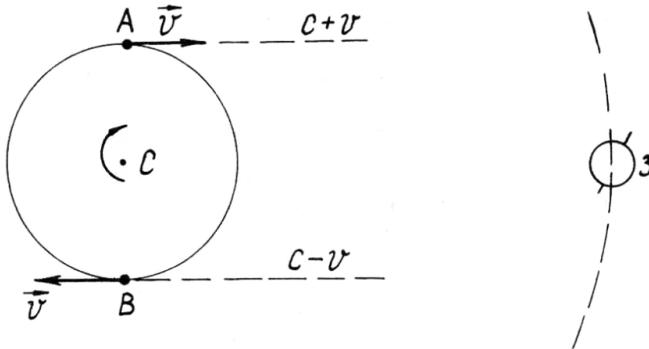


Рис. 5.6

Еще один эксперимент, связанный с астрономическими наблюдениями за двойными звездами, доказывает постоянство скорости света, ее независимость от движения источника или наблюдателя. Предполагается, что почти половина звезд нашей Галактики – двойные. Двойные звезды – это две звезды, вращающиеся относительно общего центра масс. Скорость орбитального движения двойной звезды значительна и составляет 10^4 м/с.

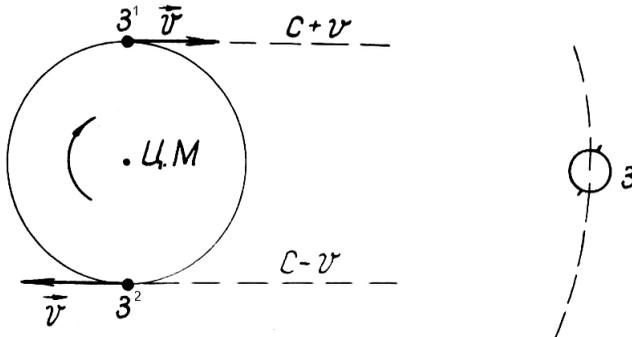


Рис. 5.7

Пусть звезды z^1 и z^2 вращаются вокруг общего центра масс (рис. 5.7). Если бы скорость света зависела от движения источника, то свет приближающейся к нам от звезды имел бы

скорость – $(c + v)$, а удаляющейся – $(c - v)$. Если орбитальная скорость звезд равна $3 \cdot 10^4$ м/с = 30 км/с, а двойная звезда находится от нас на расстоянии 100 световых лет, то свет от звезды Z^2 должен был бы пройти к наблюдателю на Земле на неделю позже по сравнению с приходом света от звезды Z^1 . Если период обращения звезды составляет 12 суток, то звезда Z^2 через 6 суток окажется в положении, занимаемом звездой Z^1 . Если скорости света от звезд Z^1 и Z^2 были бы разные, то при описанной выше ситуации каждая из звезд была бы видна одновременно в двух положениях на небосводе. Такое явление не наблюдалось, значит, скорость света не зависит от движения источника света относительно наблюдателя, она постоянна и равна c .

Выводы теории относительности о сокращении длины и замедлении времени находят прекрасное подтверждение в экспериментах с элементарными частицами, скорость движения которых близка к скорости света. В качестве примера рассмотрим движение пи-мезонов. Время их жизни составляет $\tau = 2,6 \cdot 10^{-8}$ с; период полураспада $T_{1/2} = 1,8 \cdot 10^{-8}$ с. Большое количество пионов образуется при взаимодействии протонов высокой энергии с веществом, поэтому их сравнительно легко можно изучать. Если пи-мезоны движутся со $v = 0,75c$, то среднее расстояние, которое они пролетают до распада, составляет $l' = v\tau = 0,75 \cdot 3 \cdot 10^{10} \cdot 2,6 \cdot 10^{-8} = 5,85$ (м). Эксперименты же показали, что пионы до распада проходят расстояние $8,5 \pm 0,6$ м. Это различие можно объяснить, принимая во внимание эффект Лоренца – замедление времени. Экспериментатор находится в неподвижной системе отсчета – K , а пионы – в движущейся K' . Наблюдатель в системе K измеряет время жизни пионов в системе K' и получает:

$$\tau' = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2,6 \cdot 10^{-8}}{1 - (0,75)^2} = 3,9 \cdot 10^{-8} \text{ с.}$$

Поэтому средние расстояния, пролетаемые пионами относительно экспериментатора (неподвижная система отсчета):

$$l = vt' = 0,75 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 3,9 \cdot 10^{-8} \text{ с} = 8,8 \text{ м.}$$

Измерения показали примерно такой же результат $8,5 \pm 0,6 \text{ м}$.

Рассмотрим ту же ситуацию с точки зрения пионов, т.е. в штрихованной системе K' . Время жизни пионов в этой системе отсчета $\tau = 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ до своего распада за это время они пролетают расстояние $5,85 \text{ м}$ (измеренное «линейкой» в системе K'). С точки зрения системы отсчета, связанной с пионами, экспериментатор в лаборатории пронесется мимо с $v = 0,75 \text{ с}$. В связи с этим расстояние $8,8 \text{ м}$ наблюдателю в системе отсчета, связанной с пионами K' , кажется равным $5,85$ ($8,8 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 5,85 \text{ м}$).

Этот пример из жизни, практики реально подтверждает релятивистский эффект сокращения длины и замедления времени.

Мы упоминали о парадоксе близнецов, рассмотрим суть этого парадокса подробнее. На земле живут близнецы Дмитрий и Евгений, второй из них космонавт, Евгений отправляется в путешествие к звезде со скоростью 10 световых лет*. Дмитрий останется на Земле. Если корабль, на котором Евгений летит с $v = 0,9 \text{ с}$ относительно Земли, то по часам Дмитрия это путешествие будет длиться:

$$\tau = \frac{10 \text{ св. лет}}{0,99 \text{ с}} = 10 \text{ лет.}$$

На возвращение космонавту понадобится такое же время, стало быть, все путешествие будет длиться 20 лет. Евгению же кажется, что Земля движется относительно корабля со скоростью

* Световой год свет проходит за 1 год, поэтому световой год, деленный на скорость света, равен одному году.

0,99 с, поэтому расстояние от Земли до звезды сокращается на 1,4 св. года.

$$l' = 10 \text{ св. лет} \sqrt{1 - (0,99)^2} = 1,4 \text{ св. года.}$$

Тогда по часам Евгения это путешествие будет длиться 2,8 года. Вернувшись на Землю, он постареет всего на 2,8 года, при этом обнаружит, что его брат-близнец Дмитрий постарел на $20 - 2,8 = 17,2$ года. Принимая во внимание известный факт (движение относительно), все приведенные выше рассуждения можно провести относительно системы отсчета, в которой находится Евгений. С его точки зрения, такое путешествие совершил Дмитрий вместе с Землей, поэтому при встрече Евгений должен обнаружить, что Дмитрий моложе его на 17,2 года. В чем же суть описанного парадокса? Описанная симметрия братьев-близнецов лишь кажущаяся. Дмитрий на Земле находится в инерциальной системе отсчета, тогда как его брат – в ускоренной. Корабль, стартуя с Земли, двигался ускоренно до тех пор, пока не набрал скорость 0,99 с, наконец, возвращаясь к Земле, он опять двигался с ускорением. Принимая во внимание сказанное, проведя соответствующие подсчеты, окажется, что Евгений в полете действительно будет стареть медленнее, чем его брат на Земле.

Описанный эффект позволяет надеяться на возможности преодоления огромных космических расстояний на кораблях, совершающих путешествия со скоростью, близкой к скорости света, за время много меньшее, чем человеческая жизнь. Но космонавты, вернувшиеся домой, встретятся уже с «другой Землей», на ней пройдут сотни, тысячи лет, не одно поколение людей сместится на планете. Пока о таких путешествиях лишь можно мечтать, потому что сегодня мы не знаем, как можно получить энергию, необходимую для сообщения кораблю скорости, близкой к скорости света.

Зависимость массы от скорости. Основное уравнение релятивистской механики. Первый принцип теории относительности утверждает, что физические законы одинаковы

во всех инерциальных системах отсчета. В качестве подтверждения этого постулата рассмотрим следующую ситуацию.

Пусть система отсчета K' (рис. 5.8) движется со скоростью v относительно неподвижной K . В системах K и K' находится неподвижное тело равной массы m_0 . В тот момент, когда система K' пролетает мимо K , происходит скользящее взаимодействие тел (удар), в результате которого тела начинают двигаться перпендикулярно друг другу.

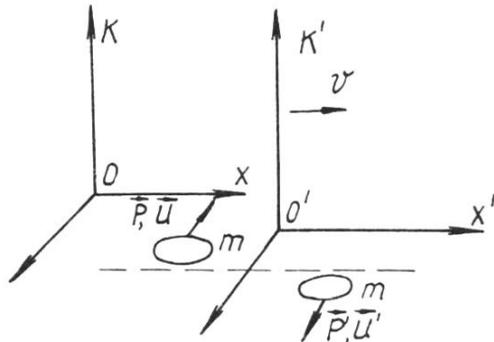


Рис. 5.8

Наблюдатель в системе отсчета K и его коллега в системе K' , пользуясь измерительными инструментами (линейка, часы), измерили скорость движения шаров, затем вычислили импульсы тел. Сравнив полученные результаты, экспериментаторы убеждаются в справедливости закона сохранения импульса при соударении шаров. Для проверки полученных результатов экспериментатор в системе K наблюдает, как проводит измерения коллега в системе K' , в свою очередь, последний наблюдает за экспериментом, проводимым в системе K . Экспериментатор системы K отмечает, что линейка в системе K' показывает те же результаты, что и у него (Лоренцево сокращение длины происходит лишь в направлении движения системы), а вот часы идут медленнее. По-

этому, с точки зрения наблюдателя системы К, скорость движения тела в системе К' оказывается меньше в $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, чем скорость такого же тела, измеренная экспериментатором в системе К. Если скорость уменьшилась, а закон сохранения импульса остается справедливым, то остается предположить, что масса тела в системе К', по мнению экспериментатора системы К, должна возрасти в $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. В свою очередь, наблюдатель в системе К' придет к таким же выводам в отношении измерений, выполненных в системе К. Анализ осуществленного эксперимента позволяет сделать важный вывод: масса движущегося тела, так же как и сокращение длины тела и замедление времени, имеющее место в инерциальной системе отсчета, оказываются симметричными для наблюдателей в системах отсчета К и К':

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (5.12)$$

где m_0 – масса тела в системе, относительно которой оно покоится (масса покоя, или собственная масса); m – масса тела, измеренная наблюдателем, движущимся со скоростью v относительно тела.

Соотношение (5.12) позволяет сделать важный вывод о том, что скорости света достичь нельзя. Если $v = c$, то выражение $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ обращается в ноль, тогда масса тела станет бесконечно большой. Бесконечно большая масса тела не имеет физического смысла, поэтому остается предположить, что все материальные тела могут двигаться со скоростью, меньшей скорости света.

Еще один пример, позволяющий сделать подобный вывод. Из классической механики Ньютона известно, что если на тело действует постоянная сила или их совокупность, то оно движется с постоянным ускорением, а скорость движущегося тела должна возрастать неограниченно. Но, как показали наши рассуждения,

она не может равномерно и неограниченно возрастать (нарушается второй принцип теории). Стало быть, необходимо сделать заключение, что в этой задаче ускорение не останется величиной постоянной, оно будет убывать. Такая ситуация будет иметь место, если с ростом скорости движения тела его масса будет непрерывно возрастать в $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. Итак, масса, так же как длина и время, относительна, именно поэтому и теория, разработанная А. Эйнштейном, получила название теории относительности.

Важным достижением теории относительности является основное уравнение релятивистской механики, которое устанавливает связь между фундаментальными понятиями, характеризующими свойства материи, – массой и энергией.

Тогда

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} = m_0 \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{c^2}\right); \quad (5.13)$$

$$m = m_0 + \frac{m_0 v^2}{2} \cdot \frac{1}{c^2}.$$

Прирост энергии тела сопровождается увеличением его массы, в свою очередь, этот прирост энергии пропорционален кинетической энергии движущегося тела. Выражение (5.13) можно переписать в виде:

$$mc^2 = m_0 c^2 + \frac{mv_0^2}{2}, \quad (5.14)$$

где mc^2 – полная энергия движущегося тела; $m_0 c^2$ – энергия покоя, или собственная энергия тела; $\frac{mv_0^2}{2}$ – кинетическая энергия.

Сумма энергии покоя и движения (т.е. кинетическая энергия) есть полная энергия тела, $E = mc^2$. Это выражение получило название соотношения Эйнштейна. Уравнение релятивистской механики (5.13) выражает тот факт, что всякому изменению энер-

гии сопутствует эквивалентное изменение массы, всякому изменению массы тела обязательно соответствует изменение энергии тела. С точки зрения общего закона сохранения и превращения энергии, это увеличение энергии и массы тела происходит за счет уменьшения энергии и массы какого-то другого тела.

Различия между m и m_0 , действительно, мало до тех пор, пока скорость тела не начнет возрастать, приближаясь по значению к скорости света в вакууме. В окружающем мире мы имеем дело с малыми скоростями движения тел, поэтому обнаружить значительные изменения массы можно, изучая движение элементарных частиц в ускорителях.

Рассмотрим такой пример. При движении автомобиля с $v = 80$ км/ч изменение массы Δm составило лишь $3 \cdot 10^{-13}\%$. В случае протона, обладающего энергией 2,5 МэВ, изменение массы составило 2%; у электрона, имеющего энергию 100 кэВ, $\Delta m = 20\%$; у протона с энергией 1 гэВ изменение массы составит 100%, т.е. масса движущегося протона в два раза возрастает по сравнению с массой покоящегося.

Приведенные примеры подтверждают реальность постулатов Эйнштейна, соотношений Лоренца относительно координат и времени. Вместе с тем, когда скорости движения материальных объектов малы по сравнению со скоростью света, то отношение $\frac{v}{c} = 0$, а множитель $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ практически равен единице, тогда преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея.

На основании всех проведенных рассуждений можно сделать вывод о преемственности классической и релятивистской физики при скорости движения тела со скоростью $v \ll c$. Сравним основные физические величины классической механики (КМ) и специальной теории относительности (СТО), соотнеся их друг с другом:

Таблица 14

СТО	Классическая механика
$x' = \frac{x-vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$	$x' = x - vt$
$t' = \frac{t-\frac{xv}{c^2}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$	$t' = t$
$u = \frac{u'+v}{1+\frac{u'v}{c^2}}$	$u = u' + v$
$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$	$m = m_0$

ОБОБЩЕНИЯ И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ В ТАБЛИЦАХ. СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Таблица 15

Основание		
Факты	Идеализированный объект теории	Понятия
Наук: математики, философии; опыт Майкельсона	Пространство – время	Относительность длины, относительность времени, относительность одновременности, относительность массы
Ядро		
Принципы	Математические уравнения	
1. Физические законы одинаковы во всех инерциальных системах отсчета 2. Скорость света одинакова во всех инерциальных системах отсчета	Преобразования Лоренца: $x = \frac{x'+vt'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}; \quad x' = \frac{x-vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ $t = \frac{t'+\frac{x'v}{c^2}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}; \quad t' = \frac{t-\frac{xv}{c^2}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$	
Следствие		
Применение, объяснение фактов, явлений, закономерностей		
1. Закон сложения скоростей 2. Зависимость массы от скорости	3. Закон взаимосвязи массы и энергии 4. Инвариантность законов природы	

**Классификация исторических опытов, составляющих базис
специальной теории относительности**

Теоретическое основание	Экспериментальный факт
ОСНОВАНИЕ	
Неприменимость принципа относительности Г. Галилея к электродинамике Д.К. Максвелла (вторая половина XIX века) Изучение природы электромагнитного взаимодействия	А. Майкельсон и Э. Морли – опровержение гипотезы о существовании эфирного ветра (1887) А. Физо – измерение скорости света в земных условиях (1849)
ЯДРО	
Скорость света одинакова во всех инерциальных системах отсчёта	А.М. Бонч-Бруевич – экспериментальное подтверждение второго постулата специальной теории относительности (1956)
Теоретическое основание	Экспериментальный факт
СЛЕДСТВИЕ	
Равенство инертной и гравитационной масс Зависимость массы от скорости Зависимости массы от скорости Эквивалентность массы и энергии	Р. Этвеш – экспериментальное подтверждение (1889) В. Кауфман – экспериментальное подтверждение (1902) А. Бухерер – экспериментальное подтверждение (1908) М. Олифант, Э. Резерфорд – экспериментальное подтверждение эквивалентности массы и энергии в ядерных реакциях (1933)

Задачи и упражнения

5.1. Наблюдатель движется мимо метровой линейки со скоростью, равной половине скорости света. Какой длины, по его измерениям, окажется эта линейка?

5.2. Наблюдатель стал двигаться мимо метровой линейки с $v = 100$ км/ч. Какую длину линейки он теперь измерит?

5.3. Какова скорость элементарной частицы, если ее масса в 10 раз превышает массу покоя?

5.4. Чему равно относительное возрастание массы реактивлайнера, летящего со скоростью 1000 км/ч?

5.5. Чему равна масса электрона с энергией 2 МэВ?

5.6. Два пучка электронов летят навстречу друг другу со скоростью $v = 0,9$ с относительно Земли. Какова относительная скорость электронов: а) с точки зрения наблюдателя на Земле; б) с точки зрения наблюдателя, движущегося с одним из пучков?

5.7. Вычислить, какой промежуток времени пройдет на часах ракеты, движущейся со скоростью v относительно земного наблюдателя, за время равное 1 часу (на часах наблюдателя): а) $v_1 = 3000$ км/ч; б) $v_2 = 100\,000$ км/ч; в) $v_3 = 299\,780$ км/ч?

ЧАСТЬ VI. ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

Развитие и становление квантовой механики. Квантовая физика – это современная теория, которая устанавливает способ описания и законы движения микрочастиц и их систем. В ней выделяют нерелятивистскую квантовую механику – теорию движения микрочастиц со скоростями, много меньшими скорости света, и релятивистскую электродинамику (квантовая теория поля) – теорию частиц, которые движутся со скоростями, близкими к скорости света, и процессов, которые приводят к изменению числа частиц, их рождению, взаимному превращению. История становления новой теории сложна и противоречива.

В XIX – начале XX веков многие ученые считали, что дальнейшее развитие физики пойдет по эволюционному пути, так как в основном ее становление произошло. Открыты: фундаментальные законы механики, закон всемирного тяготения, максвелловская теория электромагнетизма, теория атомного строения вещества, статистические подходы к системам, состоящим из большого числа частиц, подведено прочное основание под термодинамику. Разработаны фундаментальные законы природы – законы сохранения массы, электрического заряда, импульса, энергии, момента импульса. Казалось, уже никаких фундаментальных открытий не последует, разумеется, они не смогут пересмотреть сложившихся представлений на природу. Однако скоро стало ясно, что ряд проблем, касающихся физической природы излучения и вещества, строения атома, явление радиоактивности затрагивают самые глубинные основы физики XIX века. Попытки разрешить возникшие проблемы привели ученых к созданию двух новых теорий: СТО и квантовой теории. Основание последней теории составили эксперименты, связанные с открытием электрона и квантованного излучения. Исследования удивительно сходных свойств у электронов и световых квантов послужили

отправным моментом в создании квантовой теории. Рассмотрим некоторые важнейшие теоретические и экспериментальные факты, на основании которых была создана современная теория. В конце прошлого столетия одни ученые исследовали свойства электрона, другие решали задачу распределения энергии в спектре излучения нагретого твердого тела. Оба эти направления – крупные вехи в разработке квантовой теории.

Волны и квантование. Решение, казалось бы, частной задачи о тепловом излучении (испускании электромагнитных волн нагретыми телами) привело к серьезным трудностям, которые называли «ультрафиолетовой катастрофой», разрешение их привело к созданию новой теории – квантовой механики. Рассмотрим суть данной проблемы.

Всякое нагретое тело дает излучение, представляющее сплошной спектр. Он состоит из видимой части, инфракрасной и ультрафиолетовой, последняя более коротковолновая по сравнению с видимым излучением. Излучение непрерывного спектра абсолютно черного тела при некоторой равновесной температуре показало, что в спектре присутствуют все длины волн. Абсолютно черное тело представляет из себя полость, в которой проделано во внешнее пространство маленькое отверстие. В этом нагретом теле излучение покидает его только через отверстие, поэтому, за исключением малого отверстия, тело можно считать черным. На рис. 6.1 изображено абсолютно черное тело, а на рис. 6.2 – кривые распределения энергии в спектре абсолютно черного тела (АЧТ) при нескольких температурах.

Из рис. 6.2 видно, что каждая из кривых имеет максимум при длине волны, обозначенной λ_m . Эксперименты показали, что λ_m уменьшается при повышении температуры. Тело, испускающее желтый или голубой свет, горячее красного. Полное же количество излучения растет с повышением температуры. Примечательно то, что проволочные спирали, нагреваемые электрическим

током, излучают практически так же, как и абсолютно черное тело, хотя и отличаются от него. Поэтому исследование этого излучения имеет большое теоретическое и практическое значение.

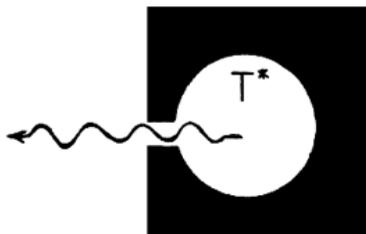


Рис. 6.1

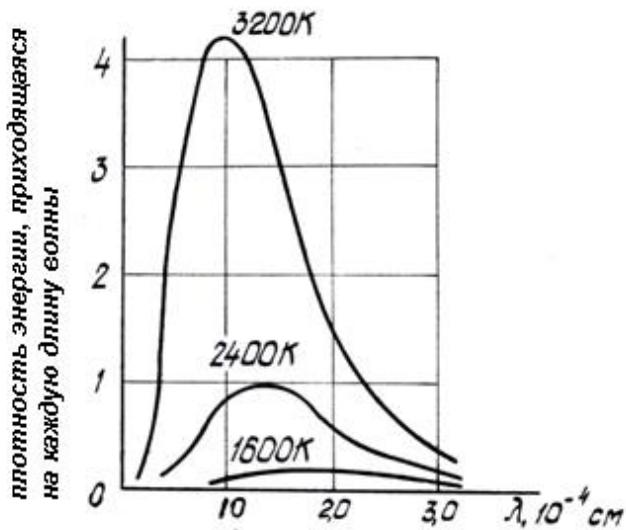


Рис. 6.2

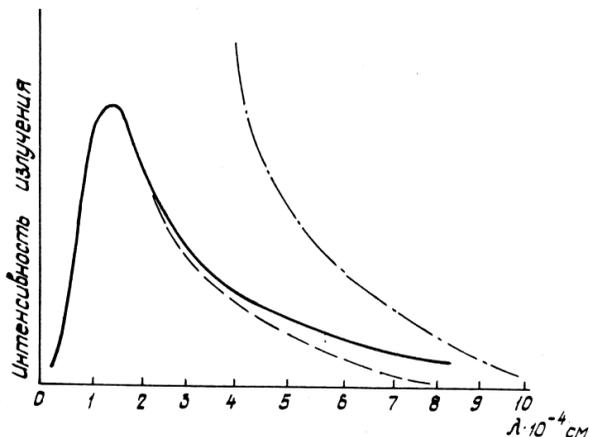


Рис. 6.3

Полученную экспериментальную кривую излучения абсолютно черного тела (рис. 6.2) пытались объяснить в рамках теории Максвелла. Расчеты, приведенные Дж. У. Релеем и Дж. Джинсом, привели к бессмысленному результату. Нагретое тело должно испускать больше видимых лучей, чем инфракрасных, больше ультрафиолетовых, чем видимых (рис. 6.3). Энергия излучения $E \sim \omega^2 T$, где ω – частота излучения; T – абсолютная температура тела. При малых частотах ω полученные теоретические расчеты неплохо согласуются с опытом (рис. 6.3). Пунктиром изображена экспериментальная кривая, полученная Релеем и Джинсом, прерывистой линией – кривая Вина. В области больших частот (в ультракороткой и еще более коротковолновой) это соотношение полностью нарушается. Теоретические расчеты М.К. Вина отличаются от эксперимента в длинноволновой части спектра, а кривая Релея и Джинса согласуется с экспериментальной только в области больших длин волн. Спектральная плотность энергии электромагнитного излучения $\rho_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}KT \sim \nu^2$, т.е. $\rho_\nu \sim \omega^2$. Интегральная плотность излучения:

$$\int_0^\infty \rho_\nu d\nu = \frac{8\pi KT}{c^3} \int_0^\infty \nu^2 d\nu = \frac{8\pi KT}{c^3} \frac{\nu^3}{3} \Big|_0^\infty \rightarrow \infty.$$

Вся энергия уходит в излучение, а стенки полости должны охлаждаться до $T = 0$. В этом – суть ультрафиолетовой катастрофы.

В 1900 году Макс Планк (1858–1947) объяснил всю форму экспериментальной кривой излучения абсолютно черного тела на основе единой формулы, которая не имела никакого теоретического объяснения:

$$\rho_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}. \quad (6.1)$$

Пытаясь обосновать полученную формулу, Планк отступает от классической теории. Он высказывает предположение о том, что излучение происходит порциями (квантами). Энергия такой порции равна некоторой постоянной, умноженной на частоту (ν):

$$\varepsilon = h\nu \text{ или } \varepsilon = \hbar\omega \left(\omega = 2\pi\nu; \hbar = \frac{h}{2\pi} \right). \quad (6.2)$$

Впервые постоянную h в физику ввел М. Планк, позже она была названа его именем, ей принадлежит фундаментальная роль. Численное значение постоянной Планка

$$h = 6,626176 (3,6) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \approx 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Как видим, эта постоянная чрезвычайно мала, поэтому при больших значениях энергии ее дискретная природа незаметна, в этом случае достаточно неклассического, классического описания процессов. В 1918 году М. Планк за квантово-механическое объяснение спектра излучения абсолютно черного тела был удостоен Нобелевской премии (1918).

Гипотеза М. Планка противоречила классическим представлениям. Большая часть ученых того времени воспринимала ее как «ловкий фокус», не имеющий научного обоснования. Надо сказать, что сам М. Планк считал свое предположение относительно квантового излучения применимым лишь к обмену энергии между излучением и полостью абсолютно черного тела и никак не связывал полученные выводы с квантовой природой электромагнитного излучения.

Через пять лет, в 1905 году, А. Эйнштейн воспользовался идеей М. Планка о дискретности излучения для объяснения закономерностей фотоэффекта (1905), который экспериментально изучался Г. Герцем и А.Г. Столетовым. А. Эйнштейн пошел дальше М. Планка, ибо впервые глубоко понял, что квантованность излучения (дискретность) проявляется не только при испускании энергии абсолютно черным телом, но и при поглощении и распространении любых электромагнитных волн. Каждая минимальная «порция излучения» обладает не только энергией $E = \hbar\omega$, пропорциональной частоте (ω), но и импульсом $p = \frac{h}{\lambda}$.

А. Эйнштейн получает Нобелевскую премию за теорию фотоэффекта, а не за теорию относительности (1921). Квант излучения, по его представлениям, во многом напоминает частицу, она излучается и поглощается целиком и была названа фотоном. Любое электромагнитное излучение состоит из большого количества волн близких частот, которые вследствие суперпозиции складываются, интерферируют. В результате этих процессов образуется локализованная группа колебаний, которая была названа волновым пакетом (фотон). Он распространяется как одно целое (рис. 6.4). На рисунке изображен волновой пакет, содержащий 9 колебаний. В действительности «волновые пакеты» содержат сотни тысяч колебаний (например, для желтого света $\nu = 5 \cdot 10^{14} \text{с}^{-1}$), таких колебаний насчитывается 600000. Пакет, имеющий такое большое количество колебаний, бесспорно, должен сохранять волновые свойства, вместе с тем это дискретное образование, которое в явлении фотоэффекта и других будет взаимодействовать с электроном как единое, неделимое и отдельное, т.е. как частица.

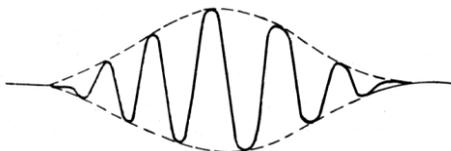


Рис. 6.4

Если идеи, высказанные А. Эйнштейном по объяснению фотоэффекта, верны, то тогда можно сделать предположение, что при взаимодействии фотона и электрона будет наблюдаться процесс рассеяния, как при любом столкновении частиц (шаров). Американский физик А. Комптон (1882–1962) осуществил такой эксперимент, исследовав рассеяние рентгеновских лучей на атомах водорода (1922). В опытах обнаружен интересный эффект, никак не согласующийся с классическими представлениями. Частота рассеянных лучей оказалась меньше частоты падающих. А. Комптон установил количественную зависимость между углом рассеяния и изменением частоты падающего и рассеянного фотона. Схема комптоновского рассеяния фотона с энергией $h\nu$ на электроне представлена на рис. 6.5.

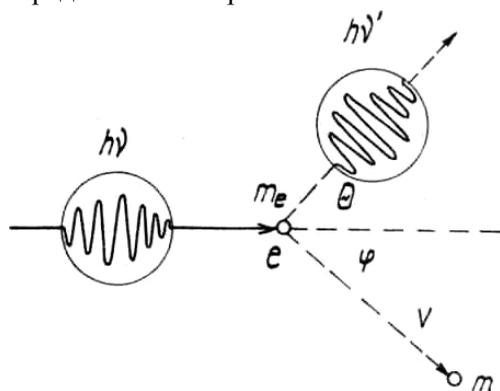


Рис. 6.5

Как показали опыты по фотоэффекту, электроны связаны с веществом. Энергия связи составляет несколько электрон-вольт. При облучении, например, серебра ультрафиолетовым светом с $\lambda = 1000 \text{ \AA}$ для полного прекращения электрического тока фотоэлектронов понадобилось напряжение $U = 7,7 \text{ В}$ или энергия $7,7 \text{ эВ}$. Энергия фотонов с $\lambda = 1000 \text{ \AA}$ составила $12,4 \text{ эВ}$. Тогда работа выхода электронов из металла, численно равная их энергии, составила $4,7 \text{ эВ}$.

$$\begin{aligned}
 [hv = E_{\kappa} + A_{\text{ввых}}; A_{\text{ввых}} = hv - E_{\kappa}; A_{\text{ввых}} = \\
 = 12,4 - 7,7 = 4,7 \text{ (ЭВ)}]
 \end{aligned}
 \tag{6.3}$$

В опытах Комптона использовал рентгеновские лучи с энергией 17,5 кэВ. Эта энергия намного больше энергии связи электронов в атоме, поэтому можно считать, что в своем эксперименте Комpton использовал свободные частицы.

Опыты показали, что импульс рассеянного кванта, оказывается, меньше импульса падающего кванта (рис. 6.5), причем эта разница тем больше, чем больше угол рассеяния (θ). Общий импульс этой системы сохраняется, поэтому можно предположить, что электрон получает некоторый импульс, увеличивая тем самым энергию. На основе закона сохранения энергии сделан вывод: энергия рассеянного фотона и его частота ($E = hv'$) должны уменьшиться. На основе законов сохранения импульса и энергии Комpton получил соотношение, связывающее частоту ν' рассеянного, падающего фотона и угла рассеяния θ . Выпуская сложные математические преобразования, запишем конечную формулу:

$$\frac{1}{\nu'} = \frac{1}{\nu} + \frac{h}{m_e c^2} (1 - \cos \theta) \text{ или } \lambda' = \lambda + \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta), \tag{6.4}$$

$\frac{h}{m_e c}$ – комптоновская длина волны электрона, ее численное значение оказалось равным $2,426 \cdot 10^{-12}$ м. Это длина волны фотона с энергией, равной энергии электрона ($m_e c^2$).

Эксперимент и расчеты убедительно показали, что фотоны ведут себя как частицы не только в явлении фотоэффекта, но и в процессах рассеяния. Выводы, полученные из эксперимента Комптона, оказались в полном противоречии с классической теорией, согласно которой, электроны под действием электромагнитной волны должны совершать вынужденные колебания этой частоты и сами становятся источником вторичных волн той же частоты. Тогда согласно классическим представлениям рассеян-

ный фотон должен иметь такую же частоту, как падающий. Эксперименты не подтвердили эти выводы. Комптон за исследования по рассеянию фотонов и их использованию был удостоен Нобелевской премии (1927).

Атомы и квантование. В 1911 году Э. Резерфорд (1871–1931) осуществил опыты по рассеянию α -частиц атомами золота. Для объяснения этих результатов он предложил планетарную модель атома. Согласно ей, электроны двигаются вокруг ядра по законам классической механики, подобно обращению планет вокруг Солнца. Предложенная модель не могла объяснить устойчивую конфигурацию атома. По законам классической механики и электродинамики электрон, движущийся ускоренно вокруг ядра под действием сил электрического притяжения, должен излучать электромагнитные волны. Вследствие этого его энергия убывает. Двигаясь по спирали, он неизбежно должен был бы упасть на ядро. Согласно расчетам, такое явление должно совершиться за стомиллионные доли секунды.

Возникшие трудности в объяснении планетарной модели атома Резерфорд смог разрешить датский физик Н. Бор (1885–1962). В 1912 году он предложил теорию атома водорода и водородоподобных ионов (т.е. ионов, имеющих всего один электрон). Эта теория основывалась на планетарной модели Э. Резерфорда и двух его постулатах. Согласно **первому** постулату: атомы могут пребывать в стационарных состояниях, которым соответствуют дискретные значения энергии (E_1 ; E_2 ; E_3 ...). Находясь в таких состояниях, атом не излучает и не поглощает энергию. Любое изменение энергии атома происходит скачкообразно при переходе его из одного стационарного состояния в другое.

В соответствии со вторым постулатом: при переходе атома из одного состояния в другое он испускает или поглощает фотон, энергия которого определяется выражением: $h\nu_{21} = E_2 - E_1$, где E_1 – энергия атома в первом стационарном состоянии; E_2 –

энергия атома во втором состоянии. Если атом переходит из состояния с большей энергией в стационарное состояние с меньшей энергией, то это сопровождается излучением фотона, обратный процесс связан с его поглощением.

Согласно теории Н. Бора, электрон в атоме может находиться не в любом стационарном состоянии, а лишь в таком, для которого выполняется соотношение: произведение модуля импульса (mv) на радиус (r) орбиты, кратно постоянной Планка (\hbar): $mvr = n\hbar$, где $n = 1, 2, 3 \dots$ Это соотношение называется **правилом квантования момента импульса**. Это правило позволило получить выражение для возможных радиусов орбит: $r_n = \frac{\hbar^2 n^2}{me^2}$.

Радиусы боровских орбит меняются дискретно с изменением числа n . При этом масса, заряд электрона, постоянная Планка определяют возможные значения электронных орбит.

Энергия стационарных состояний атома (энергетические уровни) равна:

$$E_n = -\frac{me^4}{2\hbar^2 n^2}. \quad (6.5)$$

При $n = 1$ $E_1 = -\frac{me^4}{2\hbar^2} = -2,168 \cdot 10^{-13}$ Дж = $-13,53$ эВ. В этом состоянии атом может находиться долго. Для ионизации атома водорода ему необходимо сообщить энергию $13,53$ эВ. Эта энергия получила название **энергия ионизации**. При значениях $n = 2, 3, 4 \dots$ атом переходит в возбужденное состояние, время жизни в этом состоянии 10^{-8} с. Примечательно, что за это время электрон совершает более ста миллионов оборотов вокруг ядра атома.

Частоты излучения атома водорода в соответствии со вторым постулатом Н. Бора рассчитываются по формуле:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{\hbar} = \frac{me^4}{2\pi\hbar^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right) = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad (6.6)$$

где $R = \frac{me^4}{2\pi\hbar^3}$ – постоянная Ридберга. Все частоты излучения атома водорода образуют ряд серий. Каждой соответствует определенное значение числа n и k ($n > k$). Переходы, например, на

второй энергетический уровень с верхних уровней образует серию Бальмера (видимая часть спектра). Переходы с верхних уровней на первый дает серию Лаймана, а верхних на третий – серию Ф. Пашена (ультрафиолетовая, инфракрасная части спектра соответственно).

Теория Н. Бора хорошо согласуется с экспериментом для значений частот, излучаемых атомом водорода. Несмотря на то, что эта теория была «полуклассической-полуквантовой», она все-таки отказалась от многих фундаментальных положений классической механики, которые на протяжении более 200 лет считались справедливыми. Поэтому роль экспериментальных доказательств трудно переоценить. Справедливость первого постулата Н. Бора о существовании стационарных состояний оказалась очевидной. Выводы о статусе второго постулата как следствия закона сохранения энергии и гипотезы о реальности существования фотонов не могли опровергнуть даже те исследователи, которые сомневались в справедливости теории Н. Бора. Именно сочетание классических уравнений: для полной энергии электрона в атоме и условиях устойчивости круговых орбит с правилом квантования момента импульса позволило Бору, как раньше Планку, получить важные результаты, хорошо согласуемые с экспериментом. За создание квантовой модели планетарного атома он удостоен Нобелевской премии (1922). Его модель оказалась правильной и универсальной, она сыграла большую роль в формировании квантовой механики.

Независимо от Н. Бора немецкие физики Дж. Франк (1882–1964) и Г. Герц (1887–1975) поставили опыты по возбуждению и ионизации атомов паров ртути ударами электронов (1913–1914 г.). Исследование закономерности столкновения электронов с атомами послужило доказательством дискретности уровней энергии атомов. За эту работу они были удостоены Нобелевской премии (1925).

Опишем опыт Франка и Герца подробно. Схема установки опыта представлена на рис. 6.6. Установка для проведения опыта содержала газонаполненную трехэлектродную лампу.

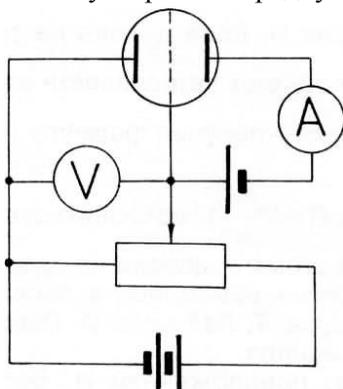


Рис. 6.6

Между катодом и сеткой создавалось ускоряющее поле, а между сеткой и анодом – слабое встречное замедляющее поле с разностью потенциалов примерно 0,5 В. Давление паров ртути таково, что длина свободного пробега электронов больше расстояния между сеткой и катодом ($p = 0,1$ мм рт. ст.). Поток электронов, ускоренных до определенной энергии, встречает на своем пути атомы ртути. Согласно классическим представлениям атомы ртути могут принимать любые значения энергии. При такой ситуации электроны при столкновении с атомами ртути в пространстве между катодом и сеткой могут полностью отдавать им энергию, при этом тока в анодной цепи не будет. Может наступить ситуация, при которой электроны в пространстве между катодами и сеткой приобретают такую энергию, при которой они долетят до анода без столкновений. В анодной цепи появится электрический ток. Дальнейшее увеличение напряжения между катодом и сеткой приведет к росту анодного тока. Исходя из классических предположений, вольтамперная характеристика должна иметь вид (рис. 6.7).

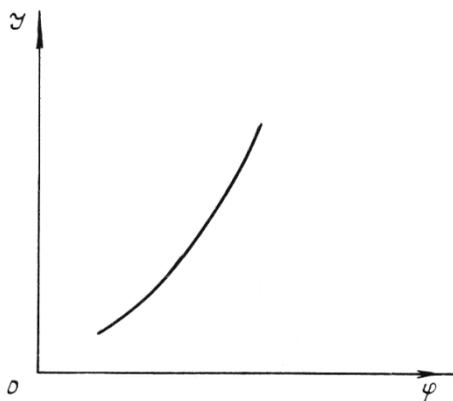


Рис. 6.7

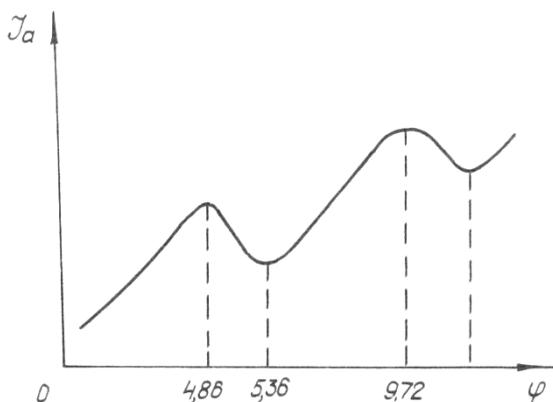


Рис. 6.8

Однако опыт показал, что анодный ток имеет ряд максимумов и минимумов (рис. 6.8). При некоторой разности потенциалов в опытах Франка и Герца ($u_1 = 4,86$ эВ) анодный ток резко уменьшается. При таком напряжении электроны теряют энергию и уже не способны преодолеть даже слабого встречного поля в пространстве сетка-анод (напряжение $0,5$ В). До напряжения $4,86$ эВ электроны, имеющие массу, примерно в 10^5 раз меньшую

массы атомов ртути, при встрече испытывают лишь упругое соударение, при этом не теряют энергию, а только меняют направление своего движения. При напряжении 4,86 эВ электроны испытывают неупругое столкновение с атомами ртути. При таком соударении они отдают энергию, приобретенную в ускоряющем промежутке ($K - C$). Потеряв ее, они не могут уже достичь анода. Анодный ток резко падает. Второе неупругое соударение, как показали опыты, будет при напряжении $u_2 = 2 \cdot 4,86$, третье – $u_3 = 3 \cdot 4,86$ и т.д.

Таким образом, атомы ртути могут поглощать энергию не менее 4,86 эВ, следующее значение 9,72 эВ и т.д. «Критические энергии», при которых электроны начинают тормозиться вследствие соударения с атомами, соответствуют энергиям перехода атома в возбужденное состояние или энергии ионизации атома (отрыв электрона от атома). «Промежуточные» значения энергии электрон не может передать атому ртути, так как он не может находиться в состояниях с такой энергией. Атом не может постепенно накапливать энергию, он принимает только вполне определенные дискретные значения. Энергия его изменяется дискретно (квантуется). Таким образом, опыты Франка и Герца с различными газами убедительно подтверждают теорию Н. Бора.

Уже в начале XX века стало ясно, что эта теория должна быть заменена другой. Она не могла ответить на вопрос, почему одни энергетические переходы более вероятны, чем другие, не смогла объяснить спектральных закономерностей более сложных атомов (атома гелия, где два электрона вращаются вокруг ядра). Теория Бора, опыты Франка и Герца завершают лишь первый этап развития квантовой механики, следующий этап ее становления связан с обнаружением волновых свойств микрочастиц.

Волновые свойства частиц. Объяснения Эйнштейном фотоэлектрического эффекта, эксперименты Комптона по рассея-

нию фотонов убедительно показали квантовый характер излучения. Электромагнитное излучение обладает такими свойствами, которые роднят его с частицами вещества. Французский физик Луи Виктор де Бройль, родившийся в 1892 году, в 1924-м высказывает предположение о том, что наряду с корпускулярным поведением волн должно обнаруживаться волновое поведение частиц. Иными словами, движение частиц де Бройль сопоставил с распространением волны.

Известно, что импульс фотона связан с длиной волны соотношением: $p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$ или $\lambda = \frac{h}{p}$. Луи де Бройль высказывает гипотезу о том, что длина волны, соответствующая движению частицы, имеет такое же соотношение, она получила название длины волны де Бройля: $\lambda = \frac{h}{p}$. Вскоре, в 1927 году, это сопоставление получило блестящее подтверждение в экспериментах по дифракции электронов в кристаллах: опыты К.Д. Дэвиссона (1881–1958) и Л.Х. Джермера (1896–1971), Д.П. Томсона (1892–1975) и П.С. Тартаковского. В 1937 году за эксперименты по обнаружению волновых свойств электрона ученые были удостоены Нобелевской премии.

Если гипотеза де Бройля верна и электроны действительно обладают волновыми свойствами, значит, они должны давать дифракционное изображение, подобно рентгеновским лучам. Известно, что, если электроны больших энергий направить на металлическую пластинку, то они вызывают коротковолновое излучение из вещества пластинки, получившее название рентгеновского. Долгое время ученые не могли доказать волновую природу этих лучей по той простой причине, что для наблюдения явления дифракции они брали обычные дифракционные решетки с большим числом штрихов.

В 1912 году немецкий физик Макс фон Лауэ (1879–1960) предложил в качестве дифракционной решетки использовать пе-

риодически расположенные слои атомов в кристаллах, расстояния между которыми соизмеримы с длиной волны рентгеновских лучей и составляют несколько ангстрем. Лауэ получил дифракционную картину рентгеновских лучей на кристалле кальцита. Проведенные измерения показали, что длина волны рентгеновских лучей имеет порядок 1 \AA . Эксперимент проводился на монокристалле и поликристалле. В случае монокристалла дифракционная картина образуется в виде пятен (лауэграмма). Зная расстояние между атомными плоскостями в кристалле, измерив расстояние между пятнами на лауэграмме, можно определить длину рентгеновской волны. Возможен обратный метод. Он нашел в настоящее время широкое распространение. По данной длине волны определяют расстояние между атомами (структуру вещества). Если направить рентгеновские лучи на поликристалл, то вместо совокупности точек на лауэграмме получим систему дифракционных колец.

В 1927 году Дж. Томсон наблюдал дифракцию электронов при прохождении их через тонкую полукристаллическую фольгу. Независимо от него примерно в это же время Дэвиссон и Джермер провели эксперимент с монокристаллом, направляя на него поток электронов. Полученная ими лауэграмма дифракции электронов очень напоминала лауэграмму дифракции рентгеновских лучей. Это сходство и является прекрасным доказательством волновых свойств частиц.

Корпускулярно-волновой дуализм. Любая движущаяся частица вещества, как и квант излучения фотон, должна обладать корпускулярными и волновыми свойствами. Корпускулярно-волновой дуализм является универсальным и фундаментальным свойством материи. Любые, в том числе, и макроскопические тела обладают волновыми свойствами, но длина волн таких тел настолько мала, что практически обнаружить ее невозможно.

Например, частица массой $m = 10^{-6}$ кг, движущаяся со скоростью $v = 1$ м/с, имеет длину волны $6,63 \cdot 10^{-28}$ м:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,62 \times 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}}{10^{-6} \text{ кг}\cdot 1 \text{ м/с}} = 6,63 \cdot 10^{-28} \text{ м}. \quad (6.7)$$

Обнаружить волновые свойства такой частицы можно с помощью дифракционной решетки с периодом 10^{-28} м. Такой структуры вещества в настоящее время наука не знает, поэтому не представляется возможным определить длины волн частиц указанных размеров. Если частица (электрон) массой $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг движется со скоростью $v \approx 10^6$ м/с, то длина волны такой частицы $\lambda = 10^{-10}$ м. Обнаружить волновые свойства такой частицы не представляет труда.

Как же все-таки надо понимать, например, электрон и фотон? Может быть, их облик меняется, представая перед нами в виде волны или частицы? Может быть, это получастицы, полуволны? Подобная постановка вопроса требует классического описания объекта, а она непригодна применительно к микропроцессам. При квантовом описании природы объекта раскрыть его сущность невозможно, не раскрыв характера проводимого над ним измерения.

Электрон и фотон проявляют квантовую и волновую природу лишь в процедуре измерения, т.е. в глазах экспериментатора. Рассмотрим пример, подтверждающий высказанное положение. Пусть пучок электронов проходит через две узкие щели плоской пластинки и попадает на экран (рис. 6.9). Закроем щель 2, весь поток электронов пройдет через щель 1 и попадет на экран (методы регистрации электронов, попавших на экран, различны, мы их не описываем). Распределение точек попадания электронов на экран показано на рис. 6.9 (а). На рисунке видно, что максимум распределения находится против щели 1. Повторим опыт для случая, когда щель 2 открыта, а щель 1 закрыта. Получим похожую картину на экране (рис. 6.9 (б)), только максимум распре-

деления электронов находится против щели 2. Теперь, если открыть обе щели, то согласно классическим представлениям, часть электронов пройдет через щель 1, другая часть через щель 2, на экране должна образоваться суммарная картина двух распределений интенсивности. Такое предположение на основе классических представлений не подтвердилось. На самом деле максимум получился посередине, между щелями, а от него отходят несколько побочных максимумов с постоянно уменьшающейся интенсивностью. Вывод можно сделать лишь один: в описанном эксперименте электроны ведут себя как волны, они создают интерференционную картину, подобно описанной ранее с электромагнитной волной.

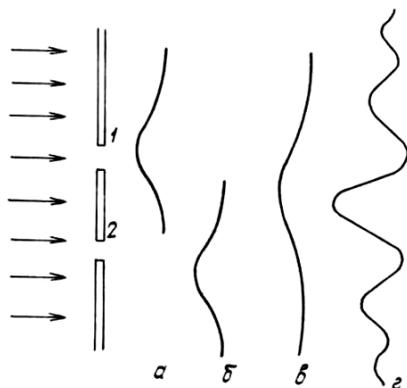


Рис. 6.9

Повторили этот эксперимент, но на пластинку с отверстиями направили очень слабый поток электронов или фотонов (свет), настолько слабый, что можно предположить: в опыте участвуют одиночные электроны или фотоны. Если через щель проходит один электрон, то он провзаимодействует с экраном в какой-то одной точке. В какой? Это предсказать невозможно. Если через щель пройдет небольшое количество электронов (фотонов), то на экране наблюдается случайный разброс распределений электронов (фотонов). Если же таких электронов (фотонов)

будет много (несколько тысяч), результаты распределения электронов на экране изобразятся плавной кривой, напоминающей кривую, изображенную на рис. 6.9 (з). Таким образом, для каждого отдельного электрона можно говорить лишь о вероятности его попадания в ту или иную точку экрана. Эта вероятность будет максимальна для точек посередине между щелями. Кривая 6.9 (в) получила название «распределение вероятностей». Если через щель проходит только один электрон или фотон, то он интерферирует с самим собой.

Отдельные электроны или фотоны проявляют волновые свойства. Они проявляются в том, что волны от одного электрона способны интерферировать.

Отдельные электроны или фотоны проявляют корпускулярные свойства, они проявляются в способности частиц взаимодействовать с веществом только в дискретных точках, которые можно назвать лишь с вероятностью. Распределение вероятностей хорошо описывается волновой теорией.

Научный период формирования квантовой теории связан с открытием двойственной природы электромагнитного излучения (корпускулярно-волновой дуализм). Позже эта двуликость была открыта у вещества (гипотеза де Бройля). Уже в первой четверти XX века был сделан общий философский вывод о том, что дуализм – неотъемлемое свойство любой материи.

Идеализированный объект квантовой теории. На первом этапе развития квантовой механики сложилось два взгляда на природу некоторого материального объекта. Согласно первому – на основе корпускулярно-волнового дуализма считалось, что реально существуют и частицы, и некие реальные волны, они сосуществуют. Сторонники другого направления (Бор, Гейзенберг, Борн, Дирак, Паули) на основе корпускулярно-волнового дуализма света и вещества, принципов неопределенности и до-

полнительности высказывали предположение о том, что материальный объект проявляет противоречивые свойства, в связи с этим и возникают противоречивые представления о нем. С одной стороны, он представляется нам в виде непрерывного поля, распределенного в пространстве и описываемого волновой функцией. С другой стороны, он выступает как частица (материальная точка). По Бору, эти два представления о материальном объекте являются дополнительными. При одном понимании микрообъекта используется причинное описание процессов; при другом – пространственно-временное. Такой подход к описанию микроявлений в квантовой механике получил название статистического. Согласно принципам неопределенности Гейзенберга и дополнителности Бора микрочастица обладает особыми свойствами. Она не фиксируется в определенной точке пространства, а находится в движении в какой-то области. Не представляется возможным описать траекторию движения материального объекта, нужны другие способы описания ее движения.

Законы движения современной физики позволяют глубже понять определенные структурные уровни материи, их связи с формами движения. Движение, измеряемое величиной наименьшей энергии, выступает как условие бытия данного материального объекта. Кроме сохраняющихся характеристик движения: энергия, импульс, момент импульса – следует назвать другие сохраняющиеся величины: заряд, масса и т.п. Масса связана с энергией соотношением $E = mc^2$. Масса – мера физических свойств материи (инерции, гравитации), а энергия – мера движения. В законе взаимосвязи массы и энергии нашло отражение важное свойство материи: неразрывность материи и движения. Исследования сущности движения свидетельствуют о том, что источники движения заключаются во взаимосвязи *противоположностей*, свойственных самой материи. Назовем некоторые из них: устой-

чивость и изменчивость, дискретность и непрерывность. Единство последнего и составляет важнейшую, неотъемлемую черту движущейся материи.

В рамках квантовой физики можно выделить следующие свойства микрообъектов:

- наличие массы, энергии, импульса заряда и др. физических величин, подтверждающих его материальность;
- наличие характеристик, подтверждающих структурность частиц;
- единство дискретности и континуальности;
- стабильность и неустойчивость в различных условиях взаимодействия;
- взаимопревращаемость;
- справедливость законов сохранения;
- неисчерпаемость связей, взаимодействий, структур.

Основные понятия и физические величины теории. Как было показано выше, волны де Бройля определяют распределение электронов по экрану. Темные и светлые кольца дифракционной картины соответствуют положению максимумов и минимумов. Наличие темных и светлых колец свидетельствует о том, что количество электронов, попадающих в эти участки, различно. Это означает, что вероятность попадания электронов в различные места экрана не одинакова. Максимумы волны де Бройля соответствуют местам большей вероятности попадания электронов на экран. Вероятностная трактовка явлений микромира – это характерная особенность квантовой механики. Движение микрочастицы в квантовой механике описывается некоторой функцией координат и времени. Она получила название волновой функции Ψ (пси-функция): $\Psi(x, y, z, t)$.

Если поле, действующее на частицу, является стационарным, т.е. не зависящим от времени, то Ψ -функцию можно представить как произведение двух сомножителей, один из которых зависит от времени, а другой от координат: $\Psi(x, y, z, t) = f(t)\Psi(x, y, z)$. Ψ -функция является вероятностной характеристикой состояния частицы.

В стационарном поле выделим некоторый малый объем $dv = dx dy dz$, в пределах которого значение Ψ -функции можно считать постоянной. Вероятность нахождения частицы dW в этом объеме пропорциональна объему dv и зависит от квадрата модуля Ψ -функции: $dW_B = |\Psi|^2 dv$, отсюда

$$|\Psi|^2 = \frac{dW_B}{dv}.$$

Интегрируя выражение $dW_B = |\Psi|^2 dv$ по некоторому объему v , найдем вероятность нахождения частицы в этом объеме

$$W_B = \int_v |\Psi|^2 dv.$$

Физический смысл имеет не сама Ψ -функция, а квадрат ее модуля $|\Psi|^2$. Он характеризует вероятность пребывания частицы в определенной точке пространства. Величина $|\Psi|^2$ есть вероятность того, что частица может быть найдена в малом объеме dv . Зная, как меняется Ψ -функция от точки к точке, можно судить о том, где вероятнее всего можно встретить частицу. Нередко для удобства частицу представляют как бы «размазанной» в определенной области пространства в виде своеобразного облака переменной плотности. Плотность электронного облака является мерой вероятности пребывания электрона в определенной точке пространства. Волны, связанные с электронами, дают возможность определить вероятность нахождения электрона в пространстве, она пропорциональна квадрату амплитуды волны в данной точке. Эти волны де Бройля получили название волн вероятно-

сти. Волну вероятности нельзя рассматривать как обычную материальную волну. Волновые свойства электрона означают не то, что они имеют волновую структуру, а то, что в своем движении он проявляет свойства волны. Если длина волны микрообъекта много меньше размеров окружающего его пространства, то такой микрообъект будет вести себя как частица: так, в электронно-лучевой трубке электроны движутся по законам движения частиц. Здесь поперечные размеры трубки много больше длины волны электрона, поэтому его волновые свойства не проявляются, их не принимают в расчет.

Для количественного описания микрочастиц нужно уметь теоретически находить длину волны вероятности частицы. Основными характеристиками свободной микрочастицы является ее энергия E и импульс P . По этим величинам можно различать длину волны вероятности, воспользовавшись постулатами де Бройля:

1. С любой микрочастицей, обладающей импульсом P , связана волна вероятности с длиной $\lambda = \frac{h}{p}$.

2. Частота волны вероятности определяется энергией частицы: $\nu = \frac{E}{h}$.

Записанные выражения для длины и частоты волн вероятности совпадают с формулами для энергии и импульса фотонов с заданной длиной волны и частотой колебания. Этот факт свидетельствует об универсальности вышеназванных постулатов для всех микрочастиц. Но фотонам, частицам с массой покоя, равной нулю, соответствует электромагнитная волна, а электронам и другим микрочастицам – волны вероятности.

Принципы теории. Постулаты де Бройля устанавливают связь волны вероятности с энергией и импульсом свободной частицы. Но чаще всего частицы объединяются в системы или находятся в связанном состоянии (например, в атоме). Связанной

частице соответствует набор волн вероятности различной длины. Эти волны интерферируют между собой на основании принципа суперпозиции, при этом дают устойчивую стоячую волну. Суть принципа суперпозиции заключается в следующем: если частица связана в ограниченной области пространства с другими, то вероятность ее положения описывается стоячей волной, которая образуется в результате интерференции волн де Бройля. Такое состояние частицы, которое описывается стоячей волной, называется стационарным, т.е. не зависящим от времени. В стационарном состоянии полная энергия частицы сохраняется.

Рассмотрим математическую формулировку принципа суперпозиции в квантовой механике. Вернемся к примеру прохождения электронов через две щели. Если открыта одна щель, то распределение вероятностей обнаружить электрон в различных точках экрана имеет вид (рис. 6.9 (а)). Оно описывается функцией $\Psi_1(x, t)$. При открытой только второй щели распределение вероятностей соответствовало бы рис. 6.9 (б) и описывалось бы волновой функцией $\Psi_2(x, t)$. Если сложить эти вероятности, то получается кривая, изображенная на рис. 6.9 (в), она описывается волновой функцией $\Psi = a\Psi_1(x, t) + b\Psi_2(x, t)$, где «а» и «b» – любые комплексные или действительные числа.

Экспериментальное же распределение вероятностей от двух щелей имеет вид, изображенный на рис. 6.9 (г). Такое распределение вероятностей можно получить теоретически, если складывать не вероятности, а амплитуды вероятностей:

$$|\Psi|^2 = \Psi\Psi^* = |\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2 + \Psi_1^*\Psi_2 + \Psi_1\Psi_2^*, \quad (6.8)$$

где Ψ^* – комплексно сопряженная функция; $|\Psi_1|^2$ – плотность вероятности, обусловленная первой щелью; $|\Psi_2|^2$ – плотность вероятности от второй щели; $(\Psi_1^*\Psi_2 + \Psi_1\Psi_2^*)$ – «интерференционный член», он может быть как положительный, так и отрицательный. Этот член характеризует тот факт, что в отличие от классической частицы, которая могла бы пройти через одну или другую щель, что дало бы интерференционную картину, изображенную

на рис. 6.9 (в) и равную выражению $(|\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2)$, при квантовом рассмотрении данных процессов происходит интерференция волн каждого из электронов на обеих щелях, а не интерференция различных волн электронов, прошедших через различные щели. Рассмотренный пример убедительно показывает, что объяснить результаты эксперимента по дифракции электронов можно на основании принципа суперпозиции применительно к квантовым системам, описанным Луи де Бройлем.

В 1927 году немецкий физик В.К. Гейзенберг (1901–1976), лауреат Нобелевской премии (1932), сформулировал соотношение неопределенности, которое является фундаментальным положением, возведенным в ранг принципа квантовой механики (принцип неопределенности). Согласно этому соотношению положение (координата) и импульс (скорость) микрочастицы могут быть заданы одновременно лишь с ограниченной степенью точности, т.е. имеют неопределенность. Чем точнее определен импульс частицы, тем более неопределенной является координата, и наоборот. Математическое соотношение имеет вид: $\Delta X \Delta P_x \geq h$. Произведение неопределенности координаты ΔX частицы на определенность проекции импульса ΔP_x на данное направление не может быть меньше постоянной Планка. Учитывая тот факт, что между импульсом и энергией существует связь, можно получить соотношение неопределенности для энергии E и времени t : $\Delta E \Delta t \geq h$. Чем больше время жизни системы, тем точнее определена ее энергия. Например, в атоме, если энергия его не меняется ($\Delta E \rightarrow 0$) и имеет вполне определенное значение, то это соответствует основному (невозбужденному) состоянию. Время пребывания атома в этом состоянии велико ($\Delta t \rightarrow \infty$). В состоянии же с малым временем жизни неопределенность энергии достаточно велика. Это приводит к тому, что энергетические уровни атома «размыты». Соотношение неопределенности – прямое следствие волновых свойств частиц.

Принцип неопределенности подчеркнул различие описания систем в классической и квантовой физике. Если состояние классической материальной точки можно задать определенными координатами (x, y, z) и импульсом, то для квантовой частицы не существует состояний, в которых ее координаты и импульс имели бы одновременно точные значения. Этот принцип убедительно доказал, что в квантовой физике должен быть совсем другой подход к описанию состояния микрочастиц.

В 1928 году Нильс Бор попытался объединить выводы, касающиеся индетерминизма квантовой теории, в положение, которое в литературе называется принципом дополнительности. Если в каком-нибудь эксперименте мы можем наблюдать одну сторону физического явления, то одновременно мы лишены возможности наблюдать дополнительную к этой первой. Дополнительными свойствами, к которым применим этот принцип, могут быть положение и импульс частицы, волновой и корпускулярный характер вещества излучения, энергия и длительность событий. Принцип дополнительности является более общим по сравнению с принципом неопределенности, последней составной частью входит в более общий принцип Бора.

Уравнение Шредингера, примеры его применения. Как было показано, состояние микрочастицы в квантовой механике описывается волновой Ψ -функцией. Каков же способ нахождения этой функции с учетом внешних условий? Для отыскания его необходимо решить основное уравнение квантовой механики австрийского физика Э. Шредингера (1887–1961). В 1933 году он удостоен Нобелевской премии за создание волновой механики (1926). Уравнение Шредингера имеет такое же значение для квантовой механики, как и уравнения Ньютона – для классической. Оно тоже постулируется, как и второй закон И. Ньютона.

Запишем это уравнение для стационарных состояний:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - E_p) \Psi = 0, \quad (6.9)$$

где m – масса частицы; E – полная энергия частицы; E_p – потенциальная энергия частицы, определяемая силовым полем, в котором эта частица находится. Для стационарных полей эта энергия не зависит от времени. Если частица движется только вдоль одного направления (оси Ox), то для этого случая уравнение Шредингера упрощается, оно принимает вид: $\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - E_p) \Psi = 0$. Чтобы понять физический смысл уравнения, рассмотрим несколько примеров.

Движение частиц в одномерной потенциальной яме.

Что понимают физики под потенциальной ямой? «Квантовая» частица, которая движется в **ОГРАНИЧЕННОЙ ОБЛАСТИ** пространства, в отличие от классической, не может иметь любые значения энергии. Эти значения строго определенные, квантованные. Что понимают под ограниченной областью пространства? Электрон не может выйти за пределы атома, в поле ядра его удерживают электрические силы. Следовательно, движение электрона происходит в ограниченной области пространства. То же самое можно сказать о движении атомов, молекул в кристалле. Частицы высокотемпературной плазмы в ограниченной области пространства удерживаются магнитным полем. Эти силовые «барьеры», ограничивающие движение микрочастиц, обычно называют *«потенциальными барьерами»*. Область пространства со всех сторон, ограниченная потенциальными барьерами, получила название потенциальной ямы. Например, пространство внутри атома – потенциальная яма для электрона; пространство внутри ядра – потенциальная яма для протонов, нейтронов. Обычно потенциальные барьеры изображают с помощью энергетической диаграммы. По вертикальной оси откладываются значения по-

тенциальной энергии микрочастицы, а по горизонтали – различные положения ее. Конечно, такая диаграмма носит условный характер, так как микрочастица не имеет определенного значения энергии.

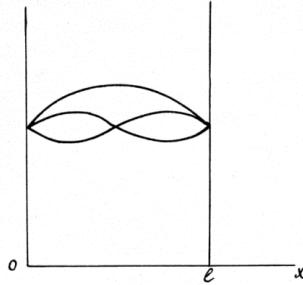


Рис. 6.10

Рассмотрим движение частицы в потенциальной яме. Пусть электрон перемещается вдоль оси Ox в пределах $0 < x < \ell$ (рис. 6.10). В указанном интервале ψ -функция отлична от нуля, вне интервала ($x \geq \ell$ и $x \leq 0$) эта функция равна нулю. Полная энергия частицы меньше, чем высота стенок ямы, поэтому электрон не может из нее выйти, вероятность обнаружить частицу на границах ямы или за ее пределами равна нулю. Вероятность местонахождения частицы характеризуется величиной $|\Psi|^2$, значит, ψ -функция на границах ямы должна быть равна нулю. Это возможно только в том случае, если на границах ямы будут узлы стоячей волны де Бройля, т.е. если в длине ямы укладывается целое число полувольт $\ell = n \frac{\lambda}{2}$, где n – любое целое число, λ – длина волны де Бройля,

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}; \ell = \frac{nh}{2mv}; v = \frac{nh}{2m\ell}. \quad (6.10)$$

Если предположить для простоты, что внутри ямы потенциальная энергия равна нулю, то полная энергия частицы определяется ее кинетической энергией:

$$E = \frac{mv^2}{2} = \frac{mn^2h^2}{8m^2\ell^2} = \frac{n^2h^2}{8m\ell^2}. \quad (6.11)$$

Полученное выражение подтверждают постулаты Н. Бора о квантованности энергии. Этот же результат можно получить, применяя уравнение Шредингера к описанной ситуации.

С учетом $E_p = 0$ для интервала $0 < x < \ell$ уравнение Шредингера имеет вид: $\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2} E \Psi = 0$, заменим: $\frac{8\pi^2 m E}{h^2} = \omega^2$, тогда получим: $\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \omega^2 \Psi = 0$. Это дифференциальное уравнение гармонического колебания, оно, как известно, имеет решение: $\Psi = \Psi_0 \cos(\omega x + \varphi_0)$, где Ψ_0 – амплитуда волновой функции; φ_0 – ее начальная фаза.

Найдем значение постоянных Ψ_0 , φ_0 , ω , для этого рассмотрим граничные условия:

1. Если $x = 0$, то $\Psi = 0$, подставим эти значения в выражение $\Psi = \Psi_0 \cos(\omega x + \varphi_0)$, получим: $0 = \Psi_0 \cos(0 + \varphi_0)$ $\Psi_0 \neq 0$, значит, $\cos \varphi_0 = 0$, $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$.

2. Если $x = \ell$, то $\Psi = 0$, с учетом $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$ имеем $0 = \Psi_0 \cos\left(\omega \ell + \frac{\pi}{2}\right)$; $\Psi_0 \neq 0$, значит, $\cos\left(\omega \ell + \frac{\pi}{2}\right) = 0$, тогда $\omega \ell + \frac{\pi}{2} = (2n + 1) \frac{\pi}{2}$. Решая данное выражение, получим: $\omega = \frac{\pi n}{\ell}$, где $n = 1, 2, 3 \dots$ Запишем выражение $\frac{8\pi^2 m E}{h^2} = \omega^2$, принимая во внимание, что $\omega = \frac{\pi n}{\ell}$, выразим значения энергии $E = \frac{h^2 n^2}{8m\ell^2}$.

Видим, что решение уравнения Шредингера для электрона в потенциальной яме приводит к выводу о дискретном значении энергии (рис. 6.12):

$$E_1 = \frac{h^2}{8m\ell^2}; E_2 = \frac{h^2}{8m\ell^2} \cdot 4; E_3 = \frac{h^2}{8m\ell^2} \cdot 9. \quad (6.12)$$

Энергетические уровни энергий E_1, E_2, E_3, E_4 (рис. 6.11) соответствуют разным состояниям электрона.

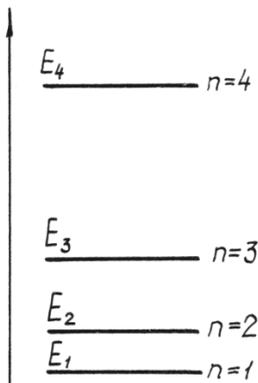


Рис. 6.11

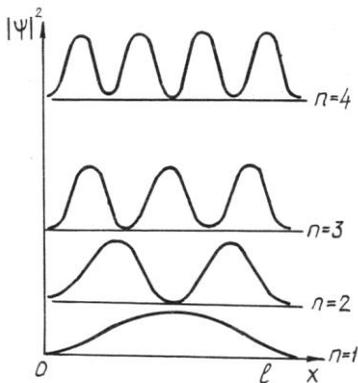


Рис. 6.12

Возведя в квадрат выражение $\Psi = \Psi_0 \cos \pi \left(\frac{x}{l} n + \frac{1}{2} \right)$, получим плотность вероятности $|\Psi|^2$ нахождения электрона в разных точках потенциальной ямы. На рис. 6.12 показана графическая зависимость Ψ^2 от x при разных значениях n , т.е. разных дискретных значениях энергии. Из рис. 6.12 видно, что электрон может с разной вероятностью находиться в разных местах потенциальной ямы, но есть такие точки, в которых эта вероятность равна нулю. Полученное выражение для энергии не только свидетельствует о том, что «частица в потенциальной яме» («ящике») может иметь только определенные, дискретные значения энергии, но и тот факт, что она в потенциальной яме не может находиться в покое. Действительно, если кинетическая энергия частицы была бы равна нулю, то тогда импульс частицы тоже был бы равен нулю, а длина волны стала бы бесконечно большой. Такую волну де Бройля невозможно заключить ни в какую «яму». Согласно теории волна де Бройля всегда имеет конечные размеры. Стало быть, невозможно выделить такую квантовую систему, которая имела бы нулевую кинетическую энергию. Даже при абсолютном нуле квантовая система обладает некоторой кинетической энергией, ее

назвали нулевой энергией. Эти выводы квантовой физики противоречат классическим представлениям, согласно которым движение должно прекратиться при абсолютном нуле

Туннельный эффект. Рассмотрим микрообъект в «потенциальной яме». Нередко стенки «ямы» не являются непроницаемыми, в этом случае волновая функция не должна обращаться в нуль на стенках ямы. В яме по-прежнему существуют стоячие волны и дискретные значения энергии (рис. 6.13). Но при такой ситуации происходит утечка энергии, частица занимает область пространства $\Delta X > l$, т.е. она может выйти за пределы потенциального барьера. Это значит, что имеется вероятность обнаружить частицу и по другую сторону барьера (электрон за пределами атома, молекулы). Частица способна «просачиваться» через потенциальный барьер, не поднимаясь на его «вершину». Такой эффект получил название туннельного.

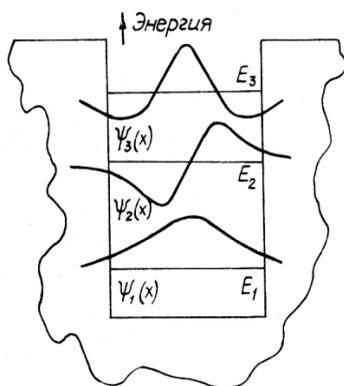


Рис. 6.13

Можно привести немало примеров, подтверждающих реальность туннельного эффекта. Один из них – явление α -распада. При радиоактивном распаде радия, полония, тория ядра атомов испускают β , γ и α -лучи. α -излучение – это поток ядер атомов гелия.

Внутри ядра ядерные силы создают потенциальный барьер, α -частица, находясь внутри ядра, не обладает достаточной энергией, чтобы преодолеть вершину потенциального барьера.

Сделаем обратное предположение – частица имеет энергию, большую потенциального барьера. Имея такую энергию, α -частица не может находиться внутри ядра. Возникает вопрос, как она приобрела такую энергию. Получить ее извне она не может, потому что процесс радиоактивного распада – самопроизвольный. Если бы α -частица покидала ядро за счет столкновений с соседними частицами, то ее полная энергия за пределами ядра была бы больше полной энергии частицы в ядре. Этого не наблюдается. Остается предположить, что частица имеет энергию меньше потенциального барьера, но может «просачиваться» через «стенки потенциальной ямы». Здесь имеет место туннельный эффект. На основании этого эффекта можно объяснить устойчивость отдельных элементов, их различное время жизни (периоды полураспада). Если ширина потенциального барьера равна неопределенности положения α -частицы ($l = \Delta X$), то возможность просачивания α -частицы через стенки «потенциальной ямы» ничтожно мала. Если же ширина барьера возросла, то вероятность увидеть частицу за пределами потенциальной ямы становится еще меньше, а время жизни такого ядра, естественно, увеличивается. Если же $\Delta X > l$, частица просачивается сквозь стенки потенциальной ямы, это соответствует распаду ядра, малому времени жизни его (незначительному периоду полураспада такого ядра). Рассмотрим еще один пример.

Применение уравнения Шредингера к атому водорода. Квантовые числа. Решить уравнение Шредингера (как было показано в первом примере) – это значит, во-первых, найти вид волновой функции Ψ , во-вторых, определить величину полной энергии микрочастицы; в-третьих, найти квадрат волновой функции, т.е. распределение электронной плотности. Описание состояния

атомов, тем более, молекул с помощью уравнения Шредингера – задача сложная. Проще она решается для одного электрона, находящегося в поле ядра. Такие системы соответствуют атому водорода и водородоподобным ионам (однократно ионизированный атом гелия, двукратно ионизированный атом лития и т.д.). Применим уравнение Шредингера к атому водорода и водородоподобным атомам. Рассматривая этот пример, мы ограничимся лишь качественным описанием.

Система протон-электрон в атоме водорода находится в стационарном состоянии. Полная энергия этой системы постоянна. Потенциальное поле в атоме водорода одинаково во всех направлениях от ядра, оно сферически-симметрично. Поэтому уравнение Шредингера проще решать не в декартовых координатах, а в сферических рис. 6.14.

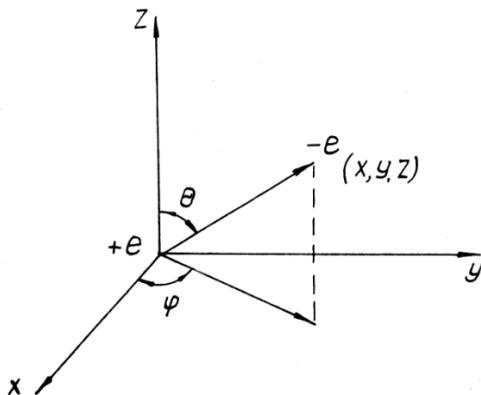


Рис. 6.14

Положение электрона определяется длиной радиус-вектора (r), углом широты (θ) и углом долготы (φ). Решение уравнения Шредингера находят в виде произведения трех функций, каждая из которых зависит от одной переменной $\Psi(r, \theta, \varphi) = f_1(r)f_2(\theta)f_3(\varphi)$. Волновая функция $f(r)$ характеризует вероятность нахождения электрона на расстоянии « r » от ядра. Функции

$f(\theta)$ и $f(\varphi)$ характеризуют вероятность нахождения электрона в различных направлениях, каждая из функций имеет целый набор решений, каждому из которых соответствует определенное квантовое число. В отличие от потенциальной ямы с высокими стенками, состояние электрона в атоме характеризуется не одним, а несколькими квантовыми числами. Под квантовым числом надо понимать целые числа (0, 1, 2, 3...) или полуцелые (1/2, 3/2, 5/2). Это числа, которые определяют возможные дискретные значения физических величин в квантовой физике. Таким образом, квантование энергии (и других величин) вытекает из решения уравнения Шредингера, в отличие от теории Н. Бора, где эти положения постулировались.

Волновая функция описывает определенное состояние электрона при заданных трех квантовых числах (n, ℓ, m_ℓ), она и определяет атомную орбиталь (АО), т.е. характеризует распределение электронной плотности вокруг ядра. Под орбиталью понимают область пространства, где вероятность пребывания электрона достаточно велика. Каждому состоянию электрона в атоме соответствует своя орбиталь с характерными очертаниями и ориентацией.

Вернемся к характеристике квантовых чисел. Главное квантовое число определяет энергию электрона. Решая уравнение Шредингера, получаем полную энергию электрона в атоме водорода:

$$E_n = -k^2 \frac{m_e q_e^4}{2n^2 \hbar^2}, \quad (6.13)$$

где n – главное квантовое число, оно определяет уровни энергии.

Полученное выражение полностью согласуется с формулой Н. Бора (6.5). На рис. 6.15 показаны возможные значения энергии атома водорода и зависимость потенциальной энергии взаимодействия электрона с ядром от расстояния. С ростом главного квантового числа n увеличивается r , полная и потенциальная энергия стремятся к нулю.

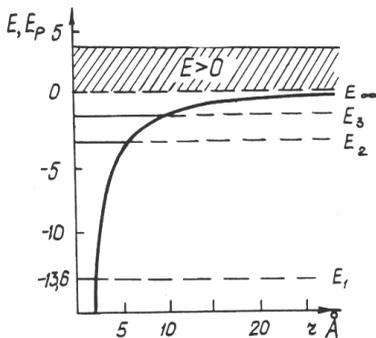


Рис. 6.15

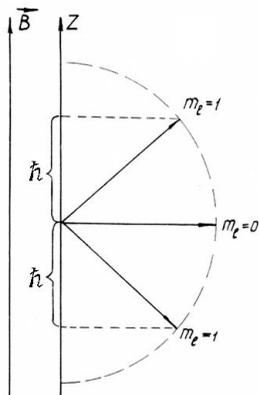


Рис. 6.16

Второе квантовое число характеризует орбитальный момент импульса электрона и называется орбитальным квантовым числом (ℓ). При данном n он принимает значения $0, 1, 2, 3 \dots n - 1$. Третье квантовое число – магнитное (m_ℓ). Оно определяет проекции орбитального момента импульса электрона на некоторое произвольно выбранное направление. При заданном ℓ магнитное квантовое число принимает значения: $0 \pm 1, \pm 2, \dots \pm \ell$, всего $(2\ell + 1)$ значений.

Магнитное квантовое число (m_ℓ) определяет возможную ориентацию орбитального момента импульса электрона и связанного с ним орбитального магнитного момента. Ориентация этого вектора возможна лишь такая, при которой его проекции на заданное направление (например, направление индукции \vec{B} внешнего магнитного поля) принимает ряд дискретных значений, кратных ($m_\ell \hbar$) (пространственное квантование). На рис. 6.16 показано возможное расположение вектора L_ℓ орбитального момента импульса электрона для Р-электрона ($\ell = 1, m_\ell = +1, 0, -1$), а проекция вектора принимает значение $\hbar; 0; -\hbar$.

Согласно принципу неопределенности вектор L_ℓ не может занимать определенного положения в пространстве, он непрерывно движется (прецессирует).

Орбитальное движение электрона в атоме водорода (т.е. движение вокруг ядра) характеризуется тремя квантовыми числами, они и определяют вид квантовой орбитали.

На основе этих трех квантовых чисел не удалось объяснить некоторые экспериментальные данные. Например, оказалось, что каждая из линий спектра атома водорода расщеплена на две линии, т.е. является дублетом. Это так называемая тонкая структура спектра, ее невозможно было объяснить на основании трех квантовых чисел. В 1925 году американские физики Д.Ю. Уленбек (1900–1988) и С.А. Гаудсмит (1902–1979) для объяснения тонкой структуры атомных спектров высказывают гипотезу о том, что электрон имеет собственный угловой момент и соответствующий ему магнитный момент. Ученые назвали этот собственный момент электрона спином, предположив, что он может вращаться вокруг собственной оси. Спиновый угловой момент также пространственно квантован, его проекция на выбранное направление Z может принимать лишь определенное значение $\hbar m_s$, где m_s – спиновое квантовое число, оно изменяется от $-S$ до $+S$, т.к. $S = 1/2$, то $m_s = -1/2; +1/2$.

Таким образом, состояние электрона определено, если заданы четыре квантовых числа n, ℓ, m_ℓ, m_s . Тогда основное состояние атома водорода (1S) становится дважды вырожденным, так как возможны два состояния n, ℓ, m_ℓ, m_s : $1, 0, 0, +1/2$; $1, 0, 0, -1/2$. Эти состояния немного отличаются энергией, поэтому в спектре атома водорода линия расщепляется.

Атомная орбиталь задается значением главного квантового числа $n = 1, 2, 3 \dots$ и буквенным значением орбитального ℓ . Состояние $\ell = 0$, обозначается буквой s; при $\ell = 1$ – буквой p; $\ell = 2$ – d; $\ell = 3$ – f и т.д. Например, для 4f орбитали главное квантовое число $n = 4$, а орбитальное 3 (таблица 17).

Таблица 17

n-уровень	ℓ -подуровень	m_ℓ	Число АО в подуровне	Число АО в уровне
1(K)	0(s)	0	1	$1=1^2$
2(L)	0(s)	0	1	$4=2^2$
	1(p)	-1, 0, 1	3	
3(M)	0(s)	0	1	$9=3^2$
	1(p)	-1, 0, 1	3	
	2(d)	-2, -1, 0, 1, 2	5	
4(N)	0(s)	0	1	$16=4^2$
	1(p)	-1, 0, 1	3	
	2(d)	-2, -1, 0, 1, 2	5	
	3(f)	-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3	7	

Число состояний с заданными n и ℓ будет $2(2\ell + 1)$. Чтобы найти общее число состояний, имеющих одинаковое квантовое число, просуммируем выражение $2(2\ell + 1)$ по всем ℓ , получим

$$\sum_{\ell=0}^{\ell=(n-1)} 2(2\ell + 1) = 2n^2. \quad (6.14)$$

Таким образом, первому уровню энергии E атома водорода соответствует два состояния электрона, второму уровню – 8; третьему – 18 и т.д.

Все АО с одним значением n условно назвали уровнем. В каждом n -уровне имеется S -орбиталей, начиная с $n = 2$ – три np -орбитали, начиная с $n = 3$ – пять nd -орбиталей; начиная с $n = 4$ – семь nf -орбиталей и т.д. Число АО в уровне – n^2 .

Распределение электронов в атоме подчиняется принципу В. Паули (1900–1958). В 1925 году он его сформулировал, а в 1945 году был удостоен Нобелевской премии. Согласно этому принципу две тождественные частицы с полуцелыми спинами не могут находиться в одном состоянии. Другими словами, в атоме состояние любых двух электронов должны различаться хотя бы одним из четырех квантовых чисел n, ℓ, m_ℓ, m_s . На одной АО, характеризующейся тремя квантовыми числами n, ℓ, m_ℓ , может

находиться или один электрон (он называется непарным), или пара электронов со значениями m_s : $+1/2$ и $-1/2$. Ф. Хунд (1896–1997) в 1927 году предложил правило, согласно которому на АО электроны стремятся расположиться так, чтобы сохранялось наибольшее число электронов с параллельными спинами. Такая конфигурация атома будет способствовать наименьшей энергии, стало быть, наиболее устойчивому его положению.

КВАНТОВАННОСТЬ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ В АТОМАХ, МОЛЕКУЛАХ И КРИСТАЛЛАХ. Уравнение Шредингера позволяет лишь приближенно описать состояние сложных атомов. В них, как было показано, энергия электронов зависит не только от главного квантового числа n , но и от орбитального ℓ . Кроме этого, в сложных атомах необходимо учитывать принцип Паули при образовании электронной конфигурации. Если один электрон в атоме находится в состоянии, характеризующемся квантовыми числами n, ℓ, m_ℓ, m_s , то другие электроны уже не могут находиться в таком же квантовом состоянии, т.е. с такими же значениями энергии. Этим обусловлен факт, что линейчатые спектры излучения и поглощения различны и своеобразны для каждого атома.

В качестве примера рассмотрим, чем определяется число состояний (энергий) электронов в атоме. Пусть полная энергия системы минимальна, тогда для $n = 1$ возможно только $\ell = 0$, $m_\ell = 0$, при этом $m_s = +1/2$; $m_s = -1/2$. В состоянии $n = 1$ могут находиться два электрона. Первая оболочка оказывается заполненной для $Z = 2$ (гелий). Она называется -оболочкой и содержит только два 1s-электрона.

Рассмотрим схему заполнения следующих двух оболочек в атоме. Чтобы образовать литий ($Z = 3$) третий электрон должен быть в состоянии с $n = 2$. Он начинает застраивать L-оболочку, в которой может быть два электрона в 2S-состоянии и 6 в 2P-состоянии (два состояния с $\ell = 1, m_\ell = 0, m_s = +1/2$, два состояния с $\ell = 1, m_\ell = +1, m_s = \pm 1/2$ и два в состоянии $\ell = 1,$

$m_\ell = -1$, $m_s = \pm 1/2$). Поэтому в L-оболочке может быть восемь возможных электронов, и начинается она с $Z = 3$ (литий) до $Z = 10$ (неон).

Следующая (M-оболочка) в состоянии с $n = 3$ содержит 18 электронов: два 3s-состояния, шесть 3p-состояний и десять 3d-состояний. Но при заполнении третьей оболочки начинает проявляться эффект экранирования заряда ядра внутренними электронами. На удаленные от ядра электроны действует заряд несколько меньший, стало быть, и меньшая сила притяжения со стороны ядра. Экранирующий эффект вызывает значительное уменьшение энергии атомных состояний. Энергия 4s-состояний оказывается ниже энергии 3d-состояний, поэтому 4s-состояние заполняется раньше, чем 3d-состояние. Аналогично 5s-состояние заполняется раньше 4d-состояния. Порядок заполнения оболочек таков: 1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 4s, 3d, 4p, 5s, 4d, 5p, 6s, 5d, 4f, 5d, 6p, 7s, 6d, 5f, 6d, 7p. Каждое состояние соответствует определенному строго квантованному значению энергии атома. Принцип Паули и эффект экранирования объясняют структуру электронных оболочек атомов. При $n \geq 3$ необходимо учесть также межэлектронное взаимодействие и отклонение поля от центрально-симметричного.

Почти все свойства атомов – химические, электрические, магнитные, оптические – зависят от конфигураций внешних электронов. С точки зрения химических представлений устойчивое существование молекул обусловлено тем, что внешние электроны атома, входящего в состав молекулы, становятся общими. Квантовая механика объясняет этот факт с помощью туннельного эффекта.

Электрон от своего ядра проходит к ядру соседнего атома («просачивается»), преодолевая потенциальный барьер, разделяющий эти атомы. Этот барьер при сближении атомов становится уже внешнего барьера молекул, препятствующих выходу элект-

трона за его пределы. Внешний барьер ограничивает область движения электронов в молекуле (его размеры 10^{-9} м), поэтому энергия электронов в молекуле так же, как и в атоме, квантуется. Известно, что поглощение и изучение энергии молекулами сопровождается образованием полосатых спектров. Из формулы для энергии микрочастицы в потенциальной яме $E = \frac{n^2 h^2}{8m\ell^2} + u_0$, где u_0 – потенциальная энергия внутри ямы, видно, что чем больше размеры ямы (ℓ), тем ближе друг к другу значения энергии микрочастицы. Учитывая тот факт, что размеры молекулы больше размеров атома, полагают, что в молекуле энергетические уровни электрона расположены ближе друг к другу, чем в атоме. Именно этот факт объясняет наличие полосатых спектров в молекулах. Подобный подход впервые дал возможность обосновать теорию валентности, особенности гомеоплярной связи.

В кристаллах потенциальные барьеры между отдельными атомами тоже узкие (примерно такого же размера, как и в молекулах). Электроны в кристаллах, благодаря туннельному эффекту, «обобществляются». Взаимный обмен энергией между соседними атомами ограничен только размерами кристалла (на его границах широкие потенциальные барьеры). Благодаря этому, энергия электронов в кристаллах тоже квантуется. Большие размеры кристалла по сравнению с атомами приводят к тому, что уровни энергии электронов в кристалле располагаются так близко, что образуют почти непрерывную полосу, которая распадается на отдельные участки-зоны. Подобное расположение энергетических уровней энергии электронов в кристалле приводит к образованию сплошных спектров излучения твердых тел.

В заключение можно сказать, что образование линейчатых, полосатых и сплошных спектров испускания и поглощения обусловлено квантованностью энергии электронов в атомах, молекулах и кристаллах.

Вынужденное излучение и лазеры. Падающий фотон с энергией $h\nu$ (рис. 6.17) возбуждает атом и приводит электрон в состояние с более высокой энергией, такой процесс получил название возбуждения. Если электрон из возбужденного состояния вернется в основное, то он излучит фотон с энергией $h\nu$. Этот процесс получил название высвечивания. Согласно квантовой механике, возбуждение и высвечивание – эквивалентные процессы; с точки зрения математики, они неразличимы. Физическое же различие этих процессов заключается в том, что в первом случае энергия поглощается, а во втором она излучается.

Если на атом в возбужденном состоянии падает фотон с энергией $h\nu = E_2 - E_1$, то он не может возбудить атом, так как он уже возбужден, но он вызывает процесс, эквивалентный возбуждению. Атом переходит в исходное положение, при этом излучает падающий и испущенный фотон в одинаковой фазе. Такое излучение получило название возбужденного, или стимулирующего. Каждый испущенный фотон может стимулировать испускание фотонов другими атомами. Может возникнуть ситуация, при которой совокупность большого числа атомов излучит всю энергию возбуждения в виде большого количества фотонов, находящихся в фазе друг с другом. Такое когерентное излучение, практически монохроматическое, узко направленное, длится, как правило, короткое время (10^{-12} с) и имеет мощность порядка 10^{13} Вт.

Заметим, что эта мощность приблизительно в сто раз превышает мощность всех электростанций в США. Направленное излучение нашло в настоящее время широкое применение. Одно из эффективных и перспективных – операции на глазах. Мощным и коротким по времени пучком можно «приваривать» к главному дну отслоившуюся сетчатку. Такой пучок может сделать микроскопическое отверстие в твердом теле, сварить материалы, не доступные никаким другим методам сварки, поэтому применяется в развитии техники радиосвязи, инфракрасной астрономии, нелинейной оптики.

Если излучение находится в диапазоне световых волн, то устройство для их получения получило название лазера (оптический генератор), в переводе с английского означает «усилитель света, основанный на вынужденном излучении». При создании лазеров необходимо было решить две задачи: во-первых, «накачать» энергию в систему и перевести атом в возбужденное состояние; во-вторых, осуществить такую ситуацию, при которой большая часть фотонов испускалась бы в одном направлении. Источники белого света не годятся для получения такого узкого направленного и мощного излучения, так как они дают поток фотонов в широком интервале энергий. Н.Г. Басов (1922–2001) и А.М. Прохоров (1916–2002) и независимо Ч.Х. Таунс (США) в 1954 году предложили первый квантовый генератор на пучке молекул аммиака, а в 1955 году был предложен трехуровневый метод создания неравновесных квантовых систем, широко используемых в квантовых генераторах. В 1964 году совместно с американским физиком Ч.Х. Таунсом (1915–2015) Н.Г. Басов и А.М. Прохоров удостоены Нобелевской премии за фундаментальные исследования в области квантовой радиофизики, приведшие к созданию генераторов и усилителей нового типа – мазеров и лазеров. Мазер, в отличие от лазера, является молекулярным генератором сантиметровых волн. В нем для получения возбужденного индуцированного колебания используется излучение возбужденных молекул. Наиболее эффективен и широко распространен в настоящее время рубиновый лазер. Рассмотрим его устройство и работу.

Рубин состоит из окиси алюминия и небольшого количества хрома, который придает кристаллу красивый красный цвет. В основном состоянии атомам хрома соответствует энергия E_0 (рис. 6.17). Источник оптической «накачки» содержит фотоны с энергией в интервале E_2 и E_3 . Фотоны такой энергии возбуждают атомы хрома и переводят их в состояние с энергией E_2 и E_3 .

Самопроизвольно электроны в атомах хрома переходят в состояние с энергией E_1 . Это состояние в лазерах является рабочим. Оно является метастабильным. Переход электронов в основное состояние сопровождается мощным направленным излучением с длиной волны 6934 \AA (красный цвет).

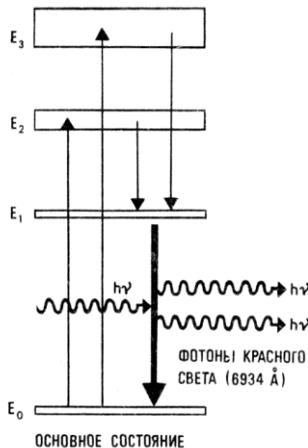


Рис. 6.17

Кристаллу рубина придают форму цилиндра. Одно основание его посеребрено, другое, ему параллельное, посеребрено частично, так что от первого основания цилиндра излучение полностью отражается, а от второго – частично. Некоторая доля излучения может пройти сквозь основание. Разрядная лампа большой мощности, имеющая форму спирали, производит «накачку» энергии. При самопроизвольном переходе энергии $E_1 \rightarrow E_0$ образовавшиеся фотоны усиливаются возбужденными фотонами и начинают двигаться параллельно оси цилиндра. Отражаясь от его оснований, они «выбивают» новые фотоны с возбужденных атомов хрома. Часть такого излучения выходит через посеребренный торец цилиндра, создавая лазерный пучок. Некоторые фотоны, движущиеся непараллельно стенкам кристалла, выходят

через боковые стенки. Они не вносят вклад в создание мощного лазерного пучка. В процессе «накачки» только часть энергии преобразуется в энергию пучка – по этой причине лазер нельзя считать «источником энергии». Его назначение – создавать мощное направленное излучение, заключенное в очень узком направленном пучке. Лазерные пучки нашли широкое применение в различного рода научных исследованиях.

Выводы. Как было показано, попытки истолковать явления атомного масштаба на основе законов и уравнений классической физики (механики, электродинамики) привели к явным противоречиям. Чтобы избежать их, потребовалось написать не только новые математические уравнения, описывающие физические процессы атомного масштаба, но и возникла необходимость постановки новых задач для осмысления таких процессов. Если классическое описание объекта возможно без учета акта наблюдения, т.е. материальный объект описывался и наблюдался «сам по себе», то неравенство Гейзенберга установило предел возможности подобного описания. Оказалось, что в явлениях атомного масштаба невозможно отделить само явление от влияния средств наблюдения (прибора, природных условий). Построенная на этой основе теория носит название квантовой. В новой теории атомный объект может проявить себя только при взаимодействии с приборами при определенных внешних материальных условиях. Таким образом, главной задачей квантовой механики является изучение результатов взаимодействия атомного объекта с классическим прибором. Затем путем соответствующих абстракций возможен переход к величинам, более близко характеризующим сам материальный объект. При определенных внешних условиях результат взаимодействия объекта и прибора не является однозначным, он обладает некоторой вероятностью. Стало быть, при описании материальных объектов атомного масштаба вводится понятие вероятности.

Понятие вероятности вводилось и в классической физике, но там этим понятием оперировали лишь в том случае, когда условия задачи не были полностью заданы и по неизвестным параметрам приходилось производить усреднение. Однако с точки зрения классической физики предполагалось, что это усреднение необязательно. Если условия задачи уточнить, то один из результатов окажется достоверным, а остальные не понадобятся совсем. Например, рассматривая движение тела, брошенного вертикально вверх, находим, что на высоте h_1 тело может находиться спустя время t_1 и t_2 . Уточнив условие задачи для случая движения тела вертикально вверх, мы оставляем лишь одно значение времени t_1 , второе t_2 отбрасываем, как не удовлетворяющее условию задачи. В квантовой физике вероятности имеют совсем другой характер. Здесь они определяют объективно существующие при данных условиях потенциальные возможности материального объекта. Рассмотрим пример. Электронный пучок взаимодействует с рабочей частью прибора. Пучок пропускают сквозь кристалл, и он попадает на фотопластинку. Если мы хотим измерить координату электрона, то получим распределение вероятностей для координаты; если мы хотим измерить импульс электрона, то будем иметь распределение вероятностей для импульса электрона. Новый квантово-механический способ описания атомных объектов должен прежде всего раскрыть потенциальные возможности взаимодействия данного объекта с другими телами (приборами). Иначе говоря, необходим такой способ описания объекта, который бы позволил получить распределение вероятностей для каждого из вариантов последней стадии взаимодействия объекта с прибором. Если известно распределение вероятностей для некоторой величины (координата, импульс), то значит, известен целый набор возможных ее значений. Поэтому квантовая механика и ставит задачу определения возможных значений каждой физической величины (например, значений энергий микрообъекта).

Если стадия измерения рассматривается в зависимости от времени, то приходится рассматривать распределение вероятностей для различных значений времени. В этом случае изучается зависимость состояния системы от времени. Введенное в квантовую физику понятие «волновая функция» описывает потенциальные возможности взаимодействия микрочастицы с прибором. Законы классической и квантовой физики отличаются еще и тем, что в математических уравнениях квантовой физики символы обозначают не числа (как, например, в классической механике), а более абстрактные математические понятия – операторы. Волновая функция, характеризующая состояние микрообъекта в определенных условиях, позволяет перейти от операторов к наблюдаемым в опыте значениям квантовой величины.

Квантовая физика дала новое понимание материи, которое расходится с классическим. В классической физике различают два вида материи (вещество и поле или поток волн). В квантовой физике вещество и поле одновременно обладают корпускулярными (дискретными) и волновыми (непрерывными) свойствами. Это принципиально новый подход к описанию процессов атомного масштаба. В настоящее время неизвестен ни один микрообъект, для которого квантовая теория была бы недостаточной. Этот факт дает основание сделать вывод, что квантовая теория – самая общая физическая теория. Тем не менее развитие этой теории еще не закончено, да и границы ее применимости пока не определены.

В противоположность ей квантовая механика (одна из основных частей квантовой теории) имеет ограниченную область применения. Методы квантовой механики пригодны лишь там, где подробно не рассматриваются процессы излучения и поглощения энергии.

ОБОБЩЕНИЯ И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ В ТАБЛИЦАХ, СХЕМАХ И РИСУНКАХ

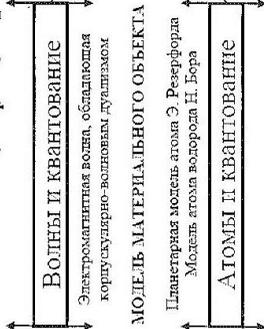
Таблица 18

Квантовая физика

ОСНОВАНИЕ		
Факты	Идеализированный объект	Понятия
<ol style="list-style-type: none"> 1. Излучение абсолютно черного тела 2. Фотозффект 3. Комптоновское рассеяние 4. Теплоемкость твердых тел 5. Опыты Э. Резерфорда 6. Теория Н. Бора 7. Опыты Д. Франка и Г. Герца 8. Гипотеза Луи де Бройля 9. Опыты Дэвисона и Джермера, Томсона и Тартаковского 10. Эксперименты Лауэ 	Микрообъект	<ol style="list-style-type: none"> 1. Волна вероятности 2. Волновая функция 3. Длина и частота волны 4. Энергия и импульс микрообъекта 5. Квант 6. Квантовые числа 7. Дискретность физических величин 8. Корпускулярно-волновой дуализм
ЯДРО		
Принципы	Математические уравнения	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Суперпозиции 2. Неопределенности 3. Дополнительности 4. Запрета (Паули) 	Уравнение Шредингера $\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - E_p)\Psi = 0$	
СЛЕДСТВИЕ		
Применение, объяснение некоторых закономерностей		
<ol style="list-style-type: none"> 1. Движение частицы в потенциальной яме 2. Туннельный эффект 3. Квантованность энергии электронов в атомах, молекулах и кристаллах 4. Вынужденное излучение и лазеры 		

Факты теоретические и экспериментальные
 излучение абсолютно черного тела, гипотеза М. Планка;
 фотоэлектрический эффект, эффект Комптона, давление
 света, теплическое действие света
 Понятия: квантование, дуализм, фотон, постоянная План-
 ка, квант излучения, фотоэффект

Уравнения: $E = h\nu$, $h\nu = A_t + \frac{mv^2}{2}$



Факты теоретические и экспериментальные
 планетарная модель атома Э. Резерфорда, модель ато-
 ма водорода Н. Бора, опыты Франка и Герца, лазерное
 излучение
 Понятия: спонтанное и вынужденное излучение, кван-
 товые числа (главное, орбитальное, магнитное, спин-
 ое), атомная орбиталь, квантованность энергии элект-
 тронов в атоме

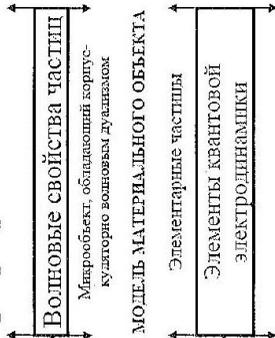
Уравнения $\nu = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$, $R = 3,293 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$,

$R = \frac{me^4}{8\hbar^2 \epsilon_0^2}$, $E = -\frac{me^4}{8\hbar^2 \epsilon_0^2} \frac{1}{n^2}$, $n = 1, 2, 3, 4, \dots$, $m = n + 1, n + 2, \dots$

$E = -\frac{me^4}{8\hbar^2 \epsilon_0^2} \frac{1}{n^2}$, $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^2}{6}$

Факты теоретические и экспериментальные
 опыты Дендрсона и Дайрмера, Томсона, эксперименты
 Луи-де Бройля, дифракция электронов
 Понятия: корпускулярно-волновой дуализм, волна вероят-
 ности, длина и частота волны вероятности, волновая
 функция

Уравнения: $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$, $\lambda = \frac{h}{p}$



Факты экспериментальные
 опыты наблюдения и регистрации заряженных
 частиц: следящий Гейгера, камера Вильсона, пу-
 зырьковая камера, метод толстослойных эмуль-
 сий

Понятия: распадное взаимодействие, захват, рас-
 сечение, радиоактивность, радиоактивное пре-
 вращение, физический вакуум, вторичное кван-
 тование, виртуальные частицы, взаимодействие
 частиц с вакуумом, фермионы, «прямые» квар-
 ки, бозоны, глюоны

Уравнения $N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$

Рис. 6.18. Структурно-логическая схема «КВАНТОВАЯ ФИЗИКА»

**Классификация исторических опытов, составляющих базис
квантовой физики (И.С. Карасова, Г.Р. Никитин)**

Теоретическое основание	Экспериментальный факт
ОСНОВАНИЕ	
Противоречие между накопленными экспериментальными фактами по исследованию зависимости излучательной способности тел от частоты (1879–1905) Изучение природы электромагнитного взаимодействия	О. Люммер и Э. Прингсгейм, Г. Рубенс и Ф. Курлбаум – экспериментально установлен закон излучения абсолютно чёрного тела (1899–1900) Р. Милликен – экспериментальная проверка уравнения А. Эйнштейна для фотоэффекта, измерение постоянной Планка (1914)
ЯДРО	
Теория фотоэффекта Планетарная модель атома Постулаты Бора (1913) Существование фотона	Г. Герц – открытие явления фотоэффекта (1887) А.Г. Столетов – установлены законы фотоэффекта (1889) Г. Гейгер, Э. Марсден, Э. Резерфорд – осуществление опыта по рассеянию альфа-частиц (1909–1910) Д. Франк и Г. Герц – опытная проверка постулатов Бора (1914) А. Комптон – открытие явления рассеяния коротковолнового излучения на свободном или слабосвязанном электроны (эффект Комптона) (1922)
СЛЕДСТВИЕ	
Накопившиеся экспериментальные факты, которые не объяснялись классическими представлениями о природе излучения и нашедшие единое объяснение теорией квантов	И. Стефан – установление закономерности между энергией излучения абсолютно черного тела и абсолютной температурой (1879) В. Вин – установление закона смешения – максимум излучения в спектре абсолютно черного тела с увеличением температуры смещается в сторону коротких волн (1893) В. Вин – установление закона распределения энергии в излучении абсолютно черного тела для коротких волн (1896)

Окончание табл.

Теоретическое основание	Экспериментальный факт
СЛЕДСТВИЕ (продолжение)	
	Дж. Рэлей, Дж. Джинс – установление закона распределения энергии в излучении абсолютно черного тела для длинных волн (1900–1905)
Опыты, иллюстрирующие частные явления и закономерности, объясняемые квантовой теорией, а также получившие широкое применение в технике	В. Рентген – открытие рентгеновских лучей (1895) О. Ган и Ф. Штрассман – открытие деления ядер урана (1938) Э. Резерфорд – осуществление первой искусственной ядерной реакции по превращению азота в кислород (1919) Э. Резерфорд и Г. Гейгер – создание прибора для регистрации заряженных частиц (1908) Ч. Вильсон – создание прибора для регистрации следов заряженных частиц (1912) Н.Г. Басов и А.М. Прохоров – создание первого квантового генератора (1954)
<i>Опыты по открытию явлений и закономерностей, предсказанных на основе квантовой теории</i>	
Э. Резерфорд – существование протона (1913) В. Эльзассер – волновые свойства электронов (1925) Э. Резерфорд, У. Харкисв – существование нейтрона (1920)	Э. Резерфорд – открытие протона (1919) К. Дэвиссон, Л. Джермер, Дж. П. Томсон – открытие явления дифракции электронов (1927) Дж. Чэдвик – открытие нейтрона (1932)

Задачи и упражнения

6.1. Во сколько раз энергия фотона рентгеновского излучения с длиной волны 1 \AA больше энергии фотона видимого света с длиной волны $\lambda = 0,4\text{ мкм}$?

6.2. Тело массой $10\text{--}3\text{ кг}$ падает с высоты $10\text{--}2\text{ м}$. Если принять, что энергия, приобретенная телом при падении, излучается в виде желтого света ($\lambda = 6 \times 10^{-7}\text{ м}$), то сколько фотонов будет испущено?

6.3. Каким наименьшим напряжением полностью задерживаются электроны, вырванные ультрафиолетовыми лучами с длиной волны $\lambda = 0,1\text{ мкм}$ из вольфрамовой пластинки. Работа выхода для вольфрама $A = 4,5\text{ эВ}$.

6.4. Фотон рентгеновских лучей с энергией 100 кэВ рассеивается на угол 90° . Чему равна энергия фотона после рассеяния?

6.5. Вычислить дебройлевские длины волн электрона и фотона, кинетические энергии которых равны $1,6 \times 10^{-16}\text{ Дж}$.

6.6. Чему равна длина волны электрона с энергией 10 эВ ?

6.7. В точке экрана $X_0 = 1$ волновая функция электронного пучка равна $+1$ (в некоторых условных единицах). В интервале ΔX вокруг этой точки наблюдается 100 световых вспышек в минуту. Какова интенсивность вспышек в точках $X_0 = 2, 3$ и 4 , если Ψ в этих точках имеет значения $+4, +2$ и -2 соответственно?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

$$1.1. v_{cp} = \frac{2v_1(v_2+v_3)}{2v_1+v_2+v_3} = 7 \text{ км/ч.}$$

$$1.2. S = 27,4 \text{ м.}$$

$S = \frac{gt^2}{2}$ – весь путь, пройденный телом,

$S = \frac{g(t-1)^2}{2}$ – путь, пройденный до последней секунды,

$$\frac{3}{2}S = \frac{gt^2}{2} - g \frac{(t-1)^2}{2}; \quad \frac{2}{3} \frac{gt^2}{2} = \frac{gt^2}{2} - \frac{gt^2}{2} + gt - \frac{g}{2}; \quad \frac{gt^2}{3} = gt - \frac{g}{2}.$$

Решая квадратное уравнение, получим $t = 2,3$ с, тогда:

$$S = \frac{gt^2}{2} = 5(2,3)^2 = 27,4 \text{ (м).}$$

1.3. $v = \frac{v_y}{\sin \alpha}$, где v – скорость вылета пули; v_y – начальная скорость движения пули вертикально вверх, или скорость падения пули в момент, когда она находится на уровне вышки. Скорость v_y – начальная скорость пули при прохождении последних 20 м пути:

$$h = v_y t + \frac{gt_1^2}{2}; \quad v_y = \frac{h}{t_1} - \frac{gt_1}{2}; \quad v = \left(\frac{h}{t_1} - \frac{gt_1}{2} \right) \frac{1}{\sin \alpha}.$$

$$v = 75 \text{ м/с.}$$

Высота подъема пули: $h_2 = h_1 + h$, где h_1 – высота подъема пули от места бросания. Определим ее из формулы $v_y^2 = 2gh_1$; $h_1 = \frac{v_y^2}{2g}$, тогда $h_2 = \frac{v_y^2}{2g}v + h$; $h_2 = 91,8$ м. Дальность полета: $S = v_x t_3$, где v_x – горизонтальная составляющая скорости: $t_3 = t_2 + (t_2 - t_1)$; t_2 – время падения пули; $(t_2 - t_1)$ – время движения пули вверх. Время t_2 определим из формулы

$$h_2 = \frac{gt_2^2}{2}; t_2 = \sqrt{\frac{2h_2}{g}}, \text{ тогда } S = v \cos \alpha \sqrt{\frac{2h_2}{g}} + \left(\sqrt{\frac{2h_2}{g}} - t_1 \right) \text{ или}$$

$$S = v \cos \alpha \left(2\sqrt{\frac{2h_2}{g}} - t_1 \right).$$

$$S = 750,87 \left(2\sqrt{\frac{2 \cdot 91,8}{9,8}} - 0,5 \right) \approx 530 \text{ м.}$$

$$1.4. T = 20 \text{ Н.}$$

Согласно второму закону Ньютона:

$$\vec{a} = \frac{m\vec{g}/2 + \vec{T}}{m/2}; a = \frac{mg/2 - T}{m/2};$$

$$T = mg/2 \left(1 - \frac{a}{g} \right).$$

Найдем ускорение движения из уравнения движения:

$$\vec{a} = \frac{m\vec{g}/l \cdot l_1 + m\vec{g}/l \cdot (l - l_1)}{m};$$

$$a = \frac{mg/l \cdot l_1 + mg/l \cdot (l - l_1)}{m} = \frac{2mgl_1}{l} - mg;$$

$$a = \frac{mg \left(\frac{2l_1}{l} - 1 \right)}{m} = g \left(\frac{2l_1}{l} - 1 \right).$$

Подставляя значение a в формулу для T , получим:

$$T = \frac{mg}{2} \left[1 - \frac{\frac{2l_1}{l} - 1}{g} \right] = mg \cdot \frac{l - l_1}{l} = 20 \text{ Н.}$$

1.5. $S + \Delta S = 3,34$ м. Если бы гимнаст удерживал груз до конца полета, то длину прыжка можно было бы рассчитать по формуле дальности полета тела, брошенного с начальной скоростью под углом α к горизонту:

$$S = \frac{v^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

Точки наивысшего подъема он достигнет через время $t = \frac{v \sin \alpha}{g}$. Бросая в верхней точке горизонтально груз, гимнаст приобретает дополнительную скорость, при этом дальность его

полета увеличится на ΔS . Скорость полета гимнаста в верхней точке $v \cos \alpha$. Чтобы вычислить приращение скорости, запишем закон сохранения импульса:

$$(m + M)v \cos \alpha = Mv_2 - mv_1, \quad (1)$$

где M – масса гимнаста; v_2 – скорость гимнаста после бросания груза; m – масса груза; v_1 – скорость груза. Выразим из (1) скорость человека:

$$v_2 = \frac{(m+M)v \cos \alpha + mv_1}{M} = v \cos \alpha + \frac{m}{M}(v \cos \alpha + v_1). \quad (2)$$

Выражение (2) позволяет сделать вывод, что горизонтальная составляющая скорости увеличится на $\frac{m}{M}(v \cos \alpha + v_1)$. Тогда длина прыжка:

$$S + \Delta S = \frac{v^2 \sin 2\alpha}{g} + \frac{m}{M}(v \cos \alpha + v_1) \frac{v \cos \alpha}{g}$$

или $S + \Delta S = 3,34$ (м).

$$1.6. F = 2,55 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

$$\Delta E = -A; 0 - mg(h + l) = -Fl;$$

$$mg \left(\frac{v^2}{2g} + l \right) = Fl;$$

$$F = mg \left(\frac{v^2}{2g} + 1 \right) \approx 2,55 \cdot 10^5 \text{ Н.}$$

Ответ: $F = 2,55 \cdot 10^5$ Н.

1.7. При закрытых дверях и окнах происходит частичное отражение звука, поэтому разговор заглушается.

1.8. Выгоднее тормозить, чем поворачивать. При торможении изменение кинетической энергии будет равно работе против сил трения. При повороте эта же сила трения будет являться силой центростремительной, заставляющей автомобиль двигаться по дуге окружности.

При торможении:

$$\Delta E_k = F_{\text{тр}} X; X = \frac{mv^2}{2F_{\text{тр}}}.$$

Чтобы автомобиль не разбился, должно выполняться условие:

$$X \leq S \text{ или } F \geq \frac{mv^2}{2S}.$$

При повороте, чтобы автомобиль не разбился, должно выполняться условие $R \leq S$, или $F = \frac{mv^2}{R}$, или $F = \frac{mv^2}{2S}$. Чтобы избежать столкновения со стеной, при торможении нужна сила трения вдвое меньше, чем при повороте, поэтому тормозить выгоднее, чем поворачивать.

1.9. $S = 100$ м. Исходя из закона сохранения энергии, изменение кинетической энергии вагона равно работе по преодолению сопротивления на пути S и на увеличение потенциальной энергии сжатых буферных пружин:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \mu mgS + 2kl^2; S = \frac{mv^2 - 4kl^2}{2\mu mg};$$

$E_{\text{п}} = \frac{1}{2}kl^2$ – потенциальная энергия одной сжатой пружины $S = 100$ м.

1.10. $v = 13,2$ м/с;

$$\frac{mv^2}{R} = mgtg\alpha; v = \sqrt{gRtg\alpha} \approx 13,2 \text{ м/с.}$$

2.1. В газах между молекулами действуют силы взаимного притяжения, стремящиеся уменьшить объем газа, значит, к внешнему давлению, сжимающему газ, добавляется еще внутреннее молекулярное давление, возникающее вследствие взаимного притяжения молекул. При исчезновении сил взаимного притяжения давление газа увеличилось бы.

2.2. $\frac{v_1}{v_2} = 1$. Уравнение газового состояния для обеих частей сосуда имеет вид: $\frac{P_0V_0}{T_0} = \frac{P_1V_1}{T_1}$; $\frac{P_02V_0}{T_0} = \frac{P_2V_2}{T_2}$, откуда $\frac{2P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$,

так как $P_1 = P_2$, то $\frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{2} \frac{T_1}{T_2}$. Подставив значение T_1 и T_2 , получим $\frac{V_1}{V_2} = 1$. Поршень разделит сосуд на две равные части.

2.3. Переход системы из состояния с параметрами – $P_1 V_1 T_1 m_1$ в состояние с параметрами – $P_2 V_2 T_2 m_2$ осуществляется в два этапа:

1) При $T = \text{const}$ из баллона выпускают половину массы газа, состояние системы характеризуется параметрами $P'_2 V_1 T_1 m_2$. Запишем уравнение Менделеева–Клапейрона для первого и второго состояния газа:

$$P_1 V = \frac{m}{\mu} RT \quad (1); \quad P'_2 V = \frac{m_2}{\mu} RT \quad (2); \quad \frac{P_1}{P'_2} = \frac{m_1}{m_2}.$$

По условию задачи $m_2 = \frac{1}{2} m_1$, поэтому $P'_2 = \frac{1}{2} P_1$.

2) На втором этапе $V = \text{const}$ и $m_2 = \text{const}$, применим закон Шарля $\frac{P'_2}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$, выразим P_2 :

$$P_2 = P'_2 \frac{T_2}{T_1}; \quad P_2 = \frac{1}{2} P_1 \frac{T_2}{T_1}; \quad P_2 = 19,2 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

2.4. Ощущение «степени» холода или тепла при соприкосновении нашего тела с каким-нибудь предметом определяется количеством тепла, которое отдается или получается нашим телом в единицу времени. Теплопроводность у металла больше, чем у дерева. Если металл и дерево нагреты до одинаковой температуры, более высокой, чем температура нашего тела, то при соприкосновении с нашим телом металл передает ему в единицу времени больше тепла, чем дерево. Если же металл холоднее нашего тела, то он отнимает от последнего в единицу времени опять-таки больше тепла, чем дерево при той же температуре. Поэтому в первом случае металл кажется теплее дерева, а во втором – холоднее. Очевидно, что при температуре, равной температуре нашего тела, когда обмена теплом не будет, и металл, и дерево будут на ощупь казаться одинаково нагретыми.

2.5. При неравномерном нагревании банки в ней непрерывно существуют конвекционные потоки, которые у дна направлены от холодной стенки к теплой. Эти потоки переносят оседающую на дно муку к более теплой стенке. Зимой стенка, обращенная к комнате, теплее, чем та, которая обращена к окну. Значит, опыт производился зимой.

$$2.6. t_2 = 19,8^\circ\text{C}.$$

$$\Delta E_k = Q; \frac{mv^2}{2} = cm(t_2 - t_1); t_2 = t_1 + \frac{v^2}{2c};$$

$$t_2 = 19,8^\circ\text{C}.$$

$$2.7. m = 202,7 \text{ кг}.$$

$\eta = K\eta_0$, где η – КПД реальной машины; η_0 – КПД идеальной машины; $K = 0,6$ по условию задачи;

$$\eta = \frac{P_n}{P_c}, P_c = \frac{P_n}{\eta} \text{ или } P_c = \frac{P_n T_1}{K(T_1 - T_2)}.$$

Энергия, расходуемая при работе машины за время t , равна

$$E = P_c t = \frac{P_n T_1 t}{K(T_1 - T_2)\eta}.$$

Эта энергия E равна количеству теплоты, полученной при сгорании m кг топлива:

$$m = \frac{Q}{q} = \frac{E}{q} = P_c t = \frac{P_n T_1 t}{K(T_1 - T_2)\eta}.$$

$$2.8. \Delta n = 9,5 \text{ оборотов}.$$

$$n_1 = \frac{\ell}{2\pi r_0(1 + \alpha t)'}.$$

где n_1 – число оборотов колеса на пути ℓ летом; зимой:

$$n_1 = \frac{\ell}{2\pi r_0(1 + \alpha t_2)}; \Delta n = n_2 - n_1 = \frac{\ell}{2\pi r_0} \left(\frac{1}{1 + \alpha t_2} - \frac{1}{1 + \alpha t_1} \right);$$

$$\Delta n = 9,5 \text{ оборотов}.$$

$$2.9. Q_1 = Q_2$$

$$c_1 m_1 (100 - 0) + \lambda_L m_2 + s_1 m_2 (100 - 0^\circ\text{C}) + L m_3 = \lambda_{CB} m_{CB} + c_{CB} m_{CB} (327 - 100);$$

$$m_{CB} = \frac{c_1 m_1 100 + m_2 \lambda_1 + c_1 m_2 100}{\lambda_{CB} + c_{CB} m_{CB} (327 - 100)}.$$

3.1. $\rho = \frac{\varepsilon \rho_k}{\varepsilon - 1}$; $\rho = 1,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

До погружения в керосин:

$$\begin{aligned} F_1 - T \sin \alpha &= 0; F_1 = T \sin \alpha; \\ mg - T \cos \alpha &= 0; mg = T \cos \alpha. \end{aligned}$$

В керосине: $\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_1}{mg}$; (1)

$$\vec{F}' + m\vec{g} + \vec{F}_A = 0$$

$$F_1' - T' \sin \alpha = 0; T' \sin \alpha = F_1'$$

$$mg - T' \cos \alpha - F_A = 0; T' \cos \alpha = mg - F_A$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_1'}{mg - F_A} \quad (2)$$

(1) и (2) соотношения приравняем $\frac{F_1}{mg} = \frac{F_1'}{mg - F_A}$;

$$\frac{kg^2}{r^2 mg} = k \frac{g^2}{\varepsilon r^2 (mg - F_A)}; mg = \varepsilon (mg - F_A)$$

$$\rho gh = \varepsilon \rho_m g V_m - \varepsilon \rho_k g V_1; \rho_m = \varepsilon \rho_m - \varepsilon \rho_k; \rho_m (\varepsilon - 1) = \varepsilon \rho_k$$

$$\rho = \frac{\varepsilon \rho_k}{\varepsilon - 1}$$

а) $E_1 = 0$; $\varphi = k \frac{g}{r}$;

б) $E_2 = gQ\sqrt{(r^2 + a^2)^3}$; $\varphi' = k \frac{g}{\sqrt{r^2 + a^2}}$.

3.2. Разобьем условно кольцо на малые элементы. Суммируя потенциалы, создаваемые отдельными элементами находим:

$$\varphi_1 = \sum k \frac{\Delta g}{r} = k \frac{g}{r}; \varphi_2 = \sum k \frac{\Delta g}{R} = \frac{g}{\sqrt{r^2 + l_1^2}}.$$

$E_2 = \sum \frac{\Delta g}{R^2} \cos \alpha = g \frac{Q}{(r^2 + a^2)^{3/2}}$ и направлена вдоль оси (составляющие напряженности поля от элементов, расположенных диаметрально противоположно в плоскости, перпендикулярной оси, взаимно компенсируют друг друга):

$$\sigma = 1,77 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}; F = 1,77 \cdot 10^{-7} \text{Н}.$$

Напряженность поля вблизи поверхности заряженного тела $E_1 = \frac{v}{\varepsilon \varepsilon_0}$, здесь $\varepsilon = 1$, E_1 – напряженность поля, создаваемого зарядами, находящимися на поверхности Земли. E_2 – напряженность поля, создаваемого зарядами на поверхности S . Напряженности $E_1 = E_2$. Суммарная напряженность равна $E/2$, тогда $\sigma = E$. Сила, действующая на участок S земной поверхности:

$$F = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} S; F = q \frac{F}{2} = \sigma \frac{SE}{2} = \frac{\varepsilon_0 SE^2}{2}.$$

$$3.4. v_1 - v_0 = \frac{(q_e E)^2 l^2}{2m^2 v_0^3} = 2,5 \cdot 10^5 \text{ м/с}.$$

На основе сохранения энергии:

$$\frac{mv_0^2}{2} + q_l \varphi_0 = \frac{mv_1^2}{2} + q_l \varphi_1 \quad (1); \varphi_0 - \varphi_1 = E_x$$

$$a = \frac{q_l E}{m}; t = \frac{l}{v_0}, \text{ поэтому } a = \frac{q_l E l^2}{2mv_0^2}$$

$$\text{Подставляя в формулу (1), выразим: } v_1 - v_0 = \frac{q_l E^2 l^2}{m^2 v_0^2}.$$

Принимая, что $v_1 + v_2 = 2v_0$, получим:

$$v_1 - v_0 = \frac{(q_l E)^2 l^2}{2m^2 v_0^3}.$$

3.5. В соответствии с принципом суперпозиции напряженность в произвольной точке $\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$; $E = E_+ + E_-$.

$$E_+ = k \frac{q}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2}; E_- = k \frac{q}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2};$$

$$E = k \frac{q}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2} - k \frac{q}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2} = k \frac{q \cdot 2rr}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2 \left(r - \frac{l}{2}\right)^2}.$$

Пренебрегая в знаменателе $\frac{1}{2}$ – по сравнению с r , получим $E = k \frac{2ql}{r^3}$. Напряженность поля диполя убывает с расстоянием

быстрее $\sim \frac{1}{r^3}$, чем напряженность поля точечного заряда пропорционально $\sim \frac{1}{r^2}$. Если напряженность поля точечного заряда пропорциональна q , то напряженность поля диполя пропорциональна дипольному моменту $ql = P$.

$$3.10. P = 10^{-3} \text{ Вт.}$$

3.11. Мощность, потребляемая контуром, должна компенсировать тепловую мощность, выделяемую в сопротивлении

$$P = I^2 gR. \quad \text{Из равенства } \frac{cu_0^2}{2} = \frac{LI^2}{2}; \quad I_g = \frac{I_0}{\sqrt{2}}; \quad \text{находим}$$

$$I_g = u_0 \sqrt{\frac{c}{2L}}, P = \frac{u_0^2 cR}{2L}.$$

4.1. Если шары соединить проволокой, то заряды будут перераспределяться между шарами до тех пор, пока потенциал обоих шаров не окажется одинаковым. Следовательно, общий заряд двух шаров $2q$ распределится между шарами так, чтобы было выполнено условие $\varphi_1 = \varphi_2$ или $\frac{q_1}{R} = \frac{q_2}{r}$ (1). С другой стороны, $2q = q_1 + q_2$ (2). Решая совместно уравнения (1) и (2), находим

$$q_1 = 2q \frac{R}{r+R}; \quad q_2 = 2q \frac{r}{R+r}.$$

4.2. Рассчитаем, какое падение напряжения приходится на каждую лампочку:

$$p_1 = \frac{u_1^2}{R_1}; \quad p_2 = \frac{u_2^2}{R_2}, \quad \text{откуда } \frac{p_1}{p_2} = \frac{p_2}{p_1}.$$

При включении лампочек последовательно в цепь с напряжением 220 В через них потечет общий ток I . Падение напряжения на лампочках равно $u_3 = IR_1$; $u_4 = IR_2$ или

$$\frac{u_3}{u_4} = \frac{IR_1}{IR_2} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{40}{60} = \frac{2}{3}.$$

Так как $u_3 + u_4 = 220$ В, то, решая последние уравнения, получим: $u_3 = 88$ В, $u_4 = 132$ В. Отсюда видно, что первая лампочка

горит с недокалом, а вторая с перекалом. Продолжительность горения второй лампочки будет сокращена.

$$4.3. v = 0,77 \cdot 10^{-3} \text{ м/с.}$$

Запишем основное уравнение электропроводности:

$$I = \frac{q}{t} = n_0 q_1 \bar{v} S; \quad \bar{v} = \frac{I}{n_0 q_1 S}.$$

Число электронов в 1 см^3 меди равно количеству атомов меди.

Определим это число атомов $n_0 = \frac{\rho}{m}$. Так как $m = \frac{\mu}{N_A}$, где μ – атомная масса меди; N_A – число Авогадро; m – масса одного атома, тогда

$$n_0 = \rho \frac{N_A}{\mu}; \quad v = \frac{I \mu}{\rho N_A q_1} = 0,77 \cdot 10^{-3} \text{ м/с.}$$

4.4. Средняя сила, с которой электроны действуют на ионы кристаллической решетки, равна силе, с которой электрическое поле действует на ионы. Силы равны, но противоположно направлены, поэтому проводник не испытывает никаких механических воздействий в направлении движения электронов.

$$4.5. R = 3,4 \cdot 10^{14} \text{ Ом.}$$

$$I = n_+ q_+ (u_+ + u_-) S E,$$

где n_+ – число пар ионов в единице объема;

$$E = \frac{\Delta \varphi}{\eta}, \text{ тогда } I = n_+ q_+ (u_+ + u_-) S \frac{\Delta \varphi}{\eta}.$$

Сравним это выражение с законом Ома для участка цепи $I = \frac{\Delta \varphi}{R}$, получим

$$R = \frac{I}{q_+ n_+ S (u_+ + u_-)} = 3,4 \cdot 10^{14} \text{ Ом.}$$

$$4.6. W = 37,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

$W = q \frac{\Delta \varphi}{\eta}$, где q – количество электричества, при прохождении которого через электролит выделяется 1 кг алюминия; $\Delta \varphi$ – напряжение, при котором ведут электролиз; η – коэффициент полезного действия установки. Из закона Фарадея $m = \frac{A q}{n F}$

находим $q = \frac{mnF}{A}$. Подставив значение в первое уравнение, получим: $W = \frac{mnF\Delta\varphi}{\eta A} = 13,4 \cdot 10^7 \text{ Дж} = 37,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$.

4.7. $r = 6 \text{ Ом}$.

$$Q = I^2 R t; I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

Решая эти уравнения совместно и исключая из них t , получим

$$Q = \frac{\varepsilon^2 R}{(R+r)^2}$$

Запишем это уравнение для случая включения в цепь проволоки с сопротивлением R_1 и R_2 :

$$Q_1 = \frac{\varepsilon 2R_1}{(R_1 + r)^2} \cdot t; Q_2 = \frac{\varepsilon 2R_2}{(R_2 + r)^2} \cdot t$$

По условию задачи $Q_1 = Q_2$, поэтому:

$$\frac{R_1}{(R_1 + r)^2} = \frac{R_2}{(R_2 + r)^2}, \text{ откуда } r = \sqrt{R_1 R_2} = 6 \text{ Ом}.$$

4.8. $R_1 = 4 \text{ Ом}$.

Сопротивление прибора R_1 найдем из закона Ома: $R_1 = \frac{\Delta\varphi}{I}$, где $\Delta\varphi_1 = (\varepsilon - \Delta\varphi_2)$ – падение напряжения на приборе; $\Delta\varphi_2 = IR_2$ – падение напряжения на катушке; $\varepsilon = \frac{\Delta\varphi}{k}$ – ЭДС индукции, возникающая во вторичной катушке. Решая уравнения совместно, получим:

$$R_1 = \frac{\varepsilon}{I} - R_2; R_1 = 4 \text{ Ом}.$$

4.9. Если включить лампы параллельно, то ярче будет светить лампа с меньшим сопротивлением. В этом случае напряжение на лампах одинаково, а следовательно, мощность, выделяемая на нити лампы, будет обратно пропорциональна сопротивлению:

$$Q_1 = \frac{\Delta\varphi^2}{r} \cdot t; Q_2 = \frac{\Delta\varphi^2}{R} \cdot t, \text{ т. е. } Q_1 > Q_2.$$

Если же включить лампы последовательно, то теперь напряжение на лампах разное, а ток в лампах один и тот же. Поэтому:

$$Q_1 = I^2 r t; Q_2 = I^2 R t, \text{ т. е. } Q_1 < Q_2,$$

т.е. ярче будет гореть лампа с большим сопротивлением.

4.10. В противном случае, вследствие электролиза грунтовой влаги, на рельсах выделялся бы кислород, что привело бы к преждевременной коррозии.

$$5.1. I' = I \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 1 \cdot \sqrt{1 - (0,5)^2} = 1 \cdot \sqrt{0,75} = 0,86.$$

$$5.2. I' = 1 \cdot \sqrt{1 - \frac{30}{3 \cdot 10^8}} = 0,99999999.$$

Вывод: релятивистское сокращение длины не имеет практически никакого значения для нашей повседневной жизни.

$$5.3. \text{ Поскольку } m = 10m_0, \text{ то } 10m_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{1}{10}.$$

Возведем в квадрат обе части последнего равенства, получим:

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = 0,01; \frac{v^2}{c^2} = 1 - 0,01; \frac{v}{c} \approx 0,995.$$

Ответ: $v = 0,995 c$.

$$5.4. \frac{v}{c} = \frac{280 \text{ м/с}}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} \approx 10^{-6}.$$

$$\frac{\Delta m}{m_0} \approx \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} = 0,5 \cdot 10^{-12}.$$

Вывод: масса возрастает очень незначительно.

5.5. Вычислим собственную энергию электрона $m_0 c^2 = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}; (3 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2 = 0,511 \text{ МэВ}$.

Кинетическая энергия электрона в единицах собственной энергии электрона $m_0 c^2$ равна $E_{\text{кин}} = 2 \text{ МэВ} \approx 4 m_0 c^2$, поэтому

$$m c^2 = m_0 c^2 + E_{\text{кин}} \approx m_0 c^2 + 4 m_0 c^2 = 5 m_0 c^2.$$

Ответ: масса электрона с энергией 2 МэВ в пять раз превышает массу покоящегося электрона.

5.6. Ответ: 1,8 с; 0,994 с.

- 5.7. Ответы: а) 9 мин 59,8 с
 б) 56 мин 34 с
 в) 29 с

6.1. Энергия фотона рентгеновского излучения $E_1 = h \frac{c}{\lambda}$.
 Энергия видимого света $E_2 = h \frac{c}{\lambda_2}$. Отсюда $\frac{E_1}{E_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$,

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{0,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}}{1 \cdot 10^{-10} \text{ м}} = 4 \cdot 10^3.$$

6.2. Энергия, приобретенная телом при падении, в точности равна его первоначальной потенциальной энергии:

$$E = mgH = 10^{-3} \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2; 10^{-2} \text{ м} = 9,8 \cdot 10^{-5} \text{ Дж};$$

$$\varepsilon = hv = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{6 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 3,3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

$$\text{Тогда число фотонов } n = \frac{E}{\varepsilon} = \frac{9,8 \cdot 10^{-5}}{3,3 \cdot 10^{-19}} = 3 \cdot 10^4.$$

6.3. Чтобы задержать вылетающие электроны, необходимо приложить такое задерживающее напряжение, чтобы $A = \Delta E_{\text{к}}$.

$q_1 \Delta \varphi = \frac{mv^2}{2}$, тогда уравнение Эйнштейна $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$ перепишем в виде $h\nu = q_1 \Delta \varphi + \frac{mv^2}{2}$.

$$\Delta \varphi = \frac{h\nu - A}{q_1}; \nu = \frac{c}{\lambda};$$

$$u = \frac{1}{c} \left(\frac{hc}{\lambda} - A \right); \Delta \varphi = 8 \text{ В}.$$

$$6.4. \frac{1}{v'} = \frac{1}{v} + \frac{h}{m_1 c^2} (1 - \cos \theta).$$

Разделив обе части равенства на h , получим

$$\frac{1}{hv'} = \frac{1}{hv} + \frac{1}{m_1 c^2} (1 - \cos \theta).$$

$$\frac{1}{hv'} = \frac{1}{100 \text{ КэВ}} + \frac{1}{511 \text{ КэВ}}; hv = \frac{100 \times 511}{100 + 511} = 84 \text{ КэВ};$$

$m_1 c^2 = 511 \text{ КэВ}; \cos 90 = 0$. Электрону передается энергия:

$$E_{\text{кин}} = h\nu - hv' = 100 - 84 = 16 \text{ (КэВ)}.$$

6.5. Воспользуемся формулой де Бройля и установим связь между длиной волны и энергией частицы: $\lambda = \frac{h}{mv}$;

$$v = \frac{h}{m\lambda}; E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{m}{2} \cdot \frac{h^2}{m^2\lambda^2} = \frac{h^2}{2m\lambda^2};$$

$$\text{отсюда } \lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE_k}}; m_\Phi = \frac{hv}{c^2} = \frac{\varepsilon}{c^2};$$

$$m_\Phi = \frac{1,6 \cdot 10^{-16} \text{ Дж}}{9 \cdot 10^{16} \text{ М/с}^2} = 0,2 \cdot 10^{-32} \text{ кг};$$

$$\lambda_1 = 3,3 \cdot 10^{-11} \text{ м}; \lambda_2 = 0,09 \cdot 10^{-11} \text{ м}.$$

Ответ: при одной и той же энергии разные по массе частицы имеют разные длины волн.

6.6. При столь малых энергиях можно использовать формулы, не учитывающие эффекты теории относительности:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}; p = mv; \text{ тогда } p = \sqrt{2m_1E_k};$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_1E_k}} = 3,86 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 3,68 \text{ \AA}.$$

Фотон с той же длиной волны имел бы энергию:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж/с} \cdot 3 \cdot 10^{10} \text{ М/с}}{3,86 \cdot 10^{-10} \text{ м} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж/эВ}} = 3,2 \cdot 10^3 \text{ эВ} \\ = 3,2 \text{ КэВ}.$$

Эта энергия соответствует рентгеновским лучам.

6.7. Интенсивность квантово-механической волны в какой-либо точке и есть вероятность найти частицу в этой точке. Вычисляя эту интенсивность (или вероятность), необходимо брать квадрат квантово-механической волновой функции, амплитуда которой равна $\Psi(X)$: $I(X_0) = A|\Psi(X_0)|^2 \Delta X$. В точке экрана $X = X_0$ волновая функция равна $\Psi(X_0)$. Для вычисления вероятности того, что электрон попадает на экран в области ΔX около точки $X = X_0$, необходимо возвести $\Psi(X_0)$ в квадрат и умножить ее на ширину интервала ΔX и на соответствующий множитель пропорциональности (A), если $X_0 = 1$, то

$$I(X_0 = 1) = A|\Psi(X_0 = 1)|^2 \Delta X = A|+1|^2 \Delta X.$$

$A \Delta X = 100$ вспышек в минуту, тогда:

$$I(X_0 = 2) = A|+4|^2 \Delta X = 16 A \Delta X = 1600 \text{ всп/мин};$$

$$I(X_0 = 3) = A|+2|^2 \Delta X = 4 A \Delta X = 400 \text{ всп/мин};$$

$$I(X_0 = 4) = A|-2|^2 \Delta X = 4 A \Delta X = 400 \text{ всп/мин}.$$

Несмотря на различие в знаках $\Psi(X_0)$, интенсивность в точках $X_0 = 3$ и 4 оказалась одинакова, так как она пропорциональна квадрату волновой функции.

Примечание. Если имеются две волновые функции $\Psi_1(X)$ и $\Psi_2(X)$, которые описывают электронные волны от двух щелей, то вероятность найти электрон в точке $X = X_0$ или интенсивность $I(X_0)$ потока электронов в этой точке определяется выражением: $I(X_0) = A|\Psi_1(X_0) + \Psi_2(X_0)|^2 \Delta X$, т.е. при вычислении интенсивности амплитуды Ψ_1 и Ψ_2 сначала необходимо сложить, а затем их сумму возвести в квадрат. Это важно, потому что волновая функция имеет знак, т.е. может быть либо положительной, либо отрицательной. Если $\Psi(X_0) = +2$; $\Psi(X_0) = -2$, то вследствие интерференции вероятность обнаружить электрон в точке $X = X_0$ равна нулю

$$I(X_0) = A|\Psi_1(X_0) + \Psi_2(X_0)|^2 \Delta X = A|(+2) + (-2)|^2 \Delta X = 0.$$

Если $\Psi_1(X_0) = +2$ и $\Psi_2(X_0) = +2$, то в результате интерференции в точке $X = X_0$ получим максимум: $I(X_0) = A|(+2) + (+2)|^2 \Delta X = 16 A \Delta X$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Астафуров, В.И. М.В. Ломоносов (Люди науки). Книга для учащихся / В.И. Астафуров. – М.: Просвещение, 1985. – 143 с.
2. Бикар, П. Фредерик Жолио-Кюри и атомная энергия / П. Бикар; пер. с франц. А.Н. Соколова. – М.: Гос. изд-во: «Литература в области атомной науки и техники», 1962. – 222 с.
3. Вайнберг, С. Открытие субатомных частиц / С. Вайнберг; пер. с англ. А.Н. Кондрашовой. – М.: Мир, 1986. – 285 с.
4. Гаврилов, С.П. Физика элементарных частиц: учебное пособие / С.П. Гаврилов, Ю.А. Гороховатский. – СПб.: Изд-во РПУ им. А.И. Герцена, 2009. – 118 с.
5. Гарднер, М. Теория относительности для миллионов / М. Гарднер; пер. с англ. В.И. Манько, К.В. Караджева, Ф.Е. Чукреева; под ред. докт. физ.-мат. наук А.Н. Базя. – М.: Атомиздат, 1967.
6. Гейзенберг, В. Физика атомного ядра / В. Гейзенберг; пер. с нем. Н.М. Суздальцевой. – М.; Ленинград: ОГИЗ, 1947. – 172 с.
7. Голин, Г.М. Классики физической науки (с древнейших времен до начала XX в.) / Г.М. Голин, С.Р. Филонович. – М.: Высшая школа, 1989.
8. Головин, И.Н. И.В. Курчатов / И.Н. Головин. – М.: Атомиздат, 1973 – 112 с.
9. Григорьев, В.И. Силы в природе / В.И. Григорьев, Г.Я. Мякишев. – М.: Наука, 1988. – 448 с.
10. Девис, П. Суперсила / П. Девис; пер. с англ. Ю.А. Данилова и Ю.Г. Рудого под ред. Е.М. Лейкина. – М.: Мир, 1989. – 272 с.
11. Дуков, В.М. Электрон. История открытия и изучения свойств / В.М. Дуков. – М.: Просвещение, 1966 – 236 с.
12. Дягилев, Ф.М. Из истории физики и жизни ее творцов (Книга для учащихся) / Ф.М. Дягилев. – М.: Просвещение, 1986. – 255 с.
13. Зоммерфельд, А. Пути познания в физике: сборник статей / А. Зоммерфельд. – М.: Наука, 1973. – 319 с.
14. Китайгородский, А. Физика – моя профессия / А. Китайгородский. – М.: Молодая гвардия, 1965. – 175 с.

15. Каганов, М.И. Квазичастицы: идеи и принципы квантовой физики твердого тела / М.И. Каганов, И.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1989. – 96 с.
16. Карасова, И.С. Конструирование учебного процесса по физике в условиях информационных технологий: монография / И.С. Карасова, М.В. Потапова. – Челябинск: Изд-во Чел. гос. пед. ун-та, 2013.
17. Карцев, В. Всегда молодая физика / В. Карцев. – М.: Советская Россия, 1983. – 368 с.
18. Кедров, Ф. Эрнест Резерфорд (Рождение ядерной физики) / Ф. Кедров. – М.: Знание, 1980. – 128 с.
19. Кедров, Б.М. Микроанатомия великого открытия / Б.М. Кедров. – М.: Наука, 1970. – 248 с.
20. Кудрявцев, С.П. Д.Д. Томсон: книга для учащихся / С.П. Кудрявцев. – М.: Просвещение, 1986. – 80 с.
21. Ландау, Л.Д. Физика для всех. Движение, теплота / Л.Д. Ландау, А.И. Китайгородский. – М.: Наука, 1965. – 392 с.
22. Лоренц, Гендрик Антон. Старые и новые проблемы физики / Г.А. Лоренц. – М.: Наука, 1970. – 370 с.
23. Манолов, К. Биография атома: атом от Кембриджа до Хиросимы / переработанный пер. с болг. В.М. Тютюнина. – М.: Мир, 1984. – 248 с.
24. Орлов, В.А. Равновесная и неравновесная термодинамика: элективный курс: учебное пособие / В.А. Орлов, Т.Т. Никифоров. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. – 120 с.
25. Перельман, Я.И. Занимательная физика: в 2 кн. / Я.И. Перельман; под ред. А.В. Митрофанова. – М.: Наука, 1986. – Кн. 1 – 224 с.
26. Перельман, Я.И. Занимательная физика: в 2 кн. / Я.И. Перельман; под ред. А.В. Митрофанова. – М.: Наука, 1983. – Кн. 2 – 272 с.
27. Пиквер, К. Великая физика. От Большого взрыва до Квантового воскресения. 250 основных вех в истории физики / К. Пиквер; пер. с англ. М.А. Смандырева. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 552 с.
28. Пономарев, Л.И. Под знаком кванта / Л.И. Пономарев. – М.: Наука, 1989. – 368 с.

29. Рипп, А.Г. Квантовая физика: учебное пособие / А.Г. Рипп. – Томск: Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 1999. – 118 с.
30. Свитков, Л.П. Термодинамика и молекулярная физика. Факультатив. курс: учеб. пособие для учащихся / Л.П. Свитков. – М.: Просвещение, 1986. – 160 с.
31. Смилга, В. Очевидное. Нет, еще не изведенное... / В. Смилга. – М.: Молодая гвардия, 1961. – 352 с.
32. Спиридонов, О.П. Фундаментальные физические постоянные / О.П. Спиридонов. – М.: Высшая школа, 1991.
33. Степанов, Б. История великого закона / Б. Степанов. – М.: Молодая гвардия, 1949. – 271 с.
34. Тарасов, Л.В. Современная физика в средней школе / Л.В. Тарасов. – М.: Просвещение, 1990. – 228 с.
35. Томсон, Ричард Л. Механическая и немеханическая наука / Ричард Л. Томсон; пер. с англ. Р. Волошин. – М.: Изд-во «Философская книга», 1998. – 302 с.
36. Хайкин, С.Э. Силы инерции и невесомость / С.Э. Хайкин. – М.: Наука, 1967. – 312 с.
37. Эдер, Р.К. Странные частицы / Р.К. Эдер, Э.К. Фаулер; пер. с англ. А.М. Моисеева, А.В. Никитина, Л.А. Тихоновой. – М.: Атомиздат, 1966. – 212 с.
38. Энциклопедия для детей. Том 16. Физика. Ч. 1. Биография физики. Путешествие в глубь материи. Механическая картина мира / глав. ред. В. Володин; метод. ред. А. Элиович. – М.: Аванта+, 2003. – 448 с.
39. Энциклопедия для детей. Том 16. Физика. Ч. 2. Электричество и магнетизм. Термодинамика и квантовая механика. Физика ядра и элементарных частиц / глав. ред. В.А. Володин; метод. ред. А. Элиович. – М.: Аванта+, 2003. – 432 с.

Учебное издание

Ирина Степановна КАРАСОВА
Марина Владимировна ПОТАПОВА
Петр Васильевич ПЕККИН

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ТЕОРИИ
В ШКОЛЕ**

Учебное пособие

ISBN 978-5-906777-72-0

Работа рекомендована РИСом ЧГПУ
Протокол № 9, пункт 13, 2015 г.

Редактор Е.М. Сапегина
Технический редактор Т.Н. Никитенко
Эксперт Л.М. Свирская

Издательство ЧГПУ
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69

Подписано в печать 21.12.2015. Объем 14 уч.-изд. л.
Формат 60×90/16. Тираж 100 экз.
Бумага типографская. Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ЧГПУ
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69