

Федеральный государственный образовательный стандарт

С.М. Андрюшечкин

ФИЗИКА

10 класс



Базовый уровень

Издатель
С. М. Андрюшечкин

Федеральный государственный образовательный стандарт

С.М. Андрюшечкин

ФИЗИКА

10 класс

Базовый уровень

ИЗДАТЕЛЬ

С. М. АНДРЮШЕЧКИН

2021

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я721
А65

А65 **Андрюшечкин, С. М.**
Физика. 10 кл. : учебник для организаций, осуществляющих образовательную деятельность. Базовый уровень. – Издание 2-е, исправленное / С. М. Андрюшечкин. – Издатель С.М. Андрюшечкин, 2021. – 304 с., ил.

ISBN 978-5-6046327-0-3

Учебник предназначен для учащихся 10-го класса общеобразовательной школы. Соответствует Федеральному государственному стандарту основного общего образования.

Учебник позволяет организовать изучение курса физики на основе деятельностного подхода, используя в качестве одного из основных методов проблемное обучение.

Может использоваться как учебное пособие.

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я721

Данный учебник в целом и никакая его часть не могут быть скопированы
без разрешения владельца авторских прав.

ISBN 978-5-6046327-0-3

© Андрюшечкин С.М., 2021

Как работать с учебником

Зачем мы будем учиться? В седьмом – девятом классах вы прошли первую ступень школьного курса физики. Сейчас у вас, вероятно, возникает законный вопрос: нужны ли вам ещё какие-либо шаги по «физическим ступеням»? Ведь во все физические «комнаты»: механика, молекулярная физика, электричество, магнетизм, оптика, атомная и ядерная физика – «двери» были открыты, и вы, надеюсь, с интересом заглянули в мир физики. Зачем же вам ещё один курс физики?

Вспомните себя в седьмом классе и сравните с собой сегодняшним. Ваши знания, умения, познавательные возможности сейчас значительно выше. Это значит, что в десятом – одиннадцатом классах вам по плечу иные задачи: не изучение отдельных научных фактов и физических законов, а **выработка системного взгляда на мир**, умение видеть природные явления в их взаимосвязи.

Физика как учебный предмет как раз и позволяет

- формировать целостную картину мира,
- овладевать научными методами познания окружающей нас действительности,
- развивать познавательные способности и применять их в рациональной деятельности.

Тем самым изучение физики позволит вам приобрести умения, необходимые всем и всегда, пригодные для достижения многих жизненных целей, – универсальные умения. Такие умения формируются при выполнении различных заданий, обозначенных в учебнике кружками и фоном условных знаков различного цвета.

Каждый цвет соответствует определённой группе умений.

-  – задания учат организовывать свою деятельность: ставить цели, планировать шаги по их достижению, оценивать результат (*регулятивные* универсальные учебные действия);
-  – задания учат работать с информацией: находить, осмысливать и критически оценивать её, преобразовывать и использовать, фиксировать различными способами (*познавательные* универсальные учебные действия);

- – задания учат взаимодействовать: общаться и понимать друг друга, договариваться и брать на себя ответственность за построение доброжелательных взаимоотношений (*коммуникативные* универсальные учебные действия);
- – задания помогают развивать качества своей личности: иметь собственную позицию, отстаивать свои взгляды и принципы, уметь услышать противоположную точку зрения и иметь мужество признавать свои ошибки, если они были допущены (личностные результаты);
- – задания на развитие предметных умений.

Как мы будем учиться? Вы приступаете к изучению курса физики старшей школы **на базовом уровне**. Главная цель изучения этого курса – помочь вам стать личностью, которая

- сформировала в себе способность к саморазвитию, умение самостоятельно учиться;
- владеет целостным представлением о мире;
- умеет как уважать и учитывать мнение и интересы других людей, так и отстаивать собственное мнение.

Такие качества личности не возникают одновременно – они формируются постепенно. Происходит это тогда, когда человек сталкивается с *проблемой* – с противоречивыми фактами и суждениями, неожиданными для него результатами жизненных наблюдений и научных опытов. Участвуя в разрешении проблемной ситуации, вы и вырабатываете у себя те качества, которые указаны как главная цель вашего образования. Потому ваша учёба будет успешна только в том случае, если вы расстанетесь с ролью стороннего наблюдателя и исполнителя, а станете *активно и деятельно работать над разрешением учебных проблем*.

Что надо обязательно запомнить? Ни один человек не может знать и запомнить всё. В учебнике приведено много интересных сведений, предложено много заданий, решено много задач. Это **максимум**, который вы можете изучить и освоить при желании. Но есть и **обязательный минимум**, который должен освоить каждый.

Как работать с учебником? Учебник предназначен для работы под руководством учителя в течение всего учебного года. В тексте учебника то, на что вам необходимо *обратить внимание*, выделено *курсивом*. То, что необходимо обязательно **запомнить** (желательно дословно), выделено **жирным шрифтом**.

Вашей успешной работе помогут:

Оглавление. Позволяет ориентироваться во всём учебнике.

Содержание раздела учебника. В нём дополнительно указаны названия отдельных частей параграфов. В тексте учебника названия отдельных частей параграфов выделены **цветом**.

Заключения к разделам учебника. В них кратко перечислены основные физические понятия, изучавшиеся в данном разделе учебника.

P. S. В постскриптумах упоминаются наиболее интересные проблемы, оставшиеся «за горизонтом» при изучении раздела.

Предметно-именной указатель. Позволяет быстро найти в учебнике значение того или иного понятия или сведения об учёном.

На переднем форзаце учебника приведены планы ответов о физических понятиях. Используйте эти планы при работе над учебным материалом (и не только по физике).

На заднем форзаце размещены справочные таблицы.

Обязательно обращайтесь внимание на **условные обозначения**, использованные в учебнике.



– Вопрос, на который следует ответить, прежде чем дальше читать текст учебника.



– Формулировка проблемы.



– Задание с использованием компьютера (информационных технологий).



– Самостоятельная исследовательская работа.



– Работа в группах (парах).



– Важнейшие понятия, которые необходимо обязательно знать.



– Основные понятия, изученные в параграфе.

Понятия, набранные жирным шрифтом, необходимо **знать и уметь применять** – это обязательный минимум. Понятия, набранные обычным шрифтом, относятся к максимуму.



– Материал для дополнительного чтения (максимум).

Каждый параграф учебника завершается заданиями, выполнение которых поможет вам лучше освоить изучаемый материал.

Приступая к выполнению задания, обратите внимание на условные обозначения, указывающие на характер задания.

Успехов!

ВВЕДЕНИЕ

Во введении обсуждается, каково место науки в человеческой цивилизации, какова связь физики с другими науками и её роль в современном обществе, а также основные естественнонаучные методы.

Рассматривается вопрос о том, как проводятся измерения и как производится обработка результатов измерений.



Вспомните понятия, изучавшиеся в курсе физики 7–9 классов, и ответьте на вопросы:

- Какова роль теорий в физической науке?
- Что такое погрешность измерений? Почему никакое измерение не может быть проведено «абсолютно точно»?
- Лауреат Нобелевской премии по физиологии и медицине академик Иван Петрович Павлов (1849–1936) писал: «Как ни совершенно крыло птицы, оно никогда не смогло бы поднять её ввысь, не опираясь на воздух. Факты – это воздух учёного. Без них вы никогда не сможете взлететь». Каким образом учёными накапливаются научные факты?

§ 1. Физика – наука о природе

Наука – часть мировой культуры

Физика и другие науки

Физика – ядро гуманитарного образования

Эксперимент. Теория. Практика

§ 2. Измерения в физике

Прямые и косвенные измерения

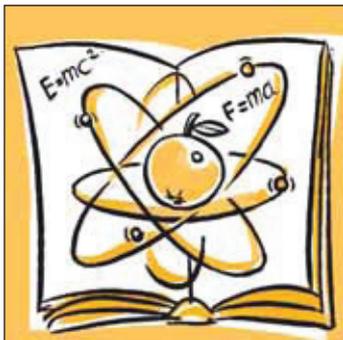
Как рассчитать погрешности измерений?

Примеры расчёта погрешности измерений

Лабораторная работа

«Определение времени двигательной реакции»

§ 1. ФИЗИКА – НАУКА О ПРИРОДЕ



Физика составляет сердцевину гуманитарного образования нашего времени.

*Исидор Раби (1898–1988),
американский физик,
лауреат Нобелевской премии*

В 7 – 9 классах вы изучили основы физики.

Наука – часть мировой культуры.

В широком смысле слова понятие *культура* включает в себя всё, что создано человечеством на пути его развития в результате созидательной деятельности. Культуру принято подразделять на материальную и духовную. *Материальная культура* охватывает всю область материальной деятельности человека и её результаты (орудия производства, средства транспорта и связи, архитектурные строения и т. д.). *Духовная культура* включает в себя воспитание и просвещение, искусство, литературу, религию, науку.

Наука – область человеческой деятельности, направленной на выработку и теоретическую систематизацию объективных знаний. Различные научные дисциплины, составляющие науку, можно подразделить на три большие группы – *естественные, технические и общественные науки.*

Естественные науки – науки о природе. Природа же – это всё, что окружает человека, весь материальный мир во всём многообразии его форм. По авторитетному мнению выдающегося американского физика-теоретика XX века, лауреата Нобелевской премии Ричарда Фейнмана, с которым солидарны другие учёные, самой фундаментальной из всех естественных наук, самой всеобъемлющей наукой о природе является **физика**. Слово «физика» происходит от греческого *physis* – природа. Оно было введено в научный обиход великим мыслителем Древней Греции Аристотелем (384–322 до нашей эры). В русском языке термин «физика» появился благодаря выдающемуся учёному-энциклопедисту Михаилу Васильевичу Ломоносову (1711–1765), который в 1746 году перевёл с немецкого языка и издал первый в России учебник физики.

Что изучает наука физика? Современное определение физики как науки, приведённое в Физическом энциклопедическом словаре, звучит следующим образом:

Физика – наука, изучающая простейшие и вместе с тем наиболее общие закономерности явлений природы, свойства и строение материи и законы её движения. Физика относится к точным наукам и изучает количественные закономерности явлений.

По утверждению академика Владимира Ивановича Вернадского (1863–1945), основоположника комплекса современных наук о Земле (геохимии, биогеохимии, радиогеологии), произошедший за последние двести лет качественный скачок в развитии науки и техники изменил роль и место человека на Земле, деятельность людей стала фактором планетарного масштаба, преобразующей силой эволюции биосферы. При этом наиболее значимые успехи в сравнении с другими естественными науками (астрономия, химия, биология и т. д.) достигнуты в физике. Будучи лидером естествознания, физика разработала основные понятия, которые являются фундаментом естественнонаучной картины мира (например: атомистическое строение вещества, концепция электромагнитного поля, иных видов взаимодействий). Именно на основе физических идей возникают и развиваются новые области научно-технического прогресса: физика сегодня – это техника завтра.

Физика и другие науки. Физические принципы изучения мира, пронизывая все естественные науки, стимулируют их развитие. Так, например, в астрономии именно физический метод спектрального анализа позволил определить химический состав бесконечно удалённых звёзд и установить, что в составе звёзд нет химических элементов, не встречающихся на Земле. Именно физика позволила выяснить, что является источником энергии звёзд. Физика, установив строение атома (ядро и электронная оболочка), позволила понять, что химические реакции и происходящие при этом превращения веществ обусловлены изменениями в электронных оболочках атомов в ходе химических реакций. Физики выяснили, что номер химического элемента в Периодической системе Д. И. Менделеева совпадает с числом протонов в ядре, а значит, и с числом электронов в нейтральном атоме, определяя химические свойства элемента. Пронизана физическими понятиями и биология – наука о жизни во всех её проявлениях. Как осуществляется процесс зрения, как работает орган слуха, как происходит передача электрического по своей природе нервного импульса, как изменяется давление крови при сокращениях сердечной мышцы – вот только несколько из множества физических вопросов, представляющих интерес для биологии. Внедрение физических методов исследования и современных физико-технических средств эксперимента (например, использование электронных микроскопов,

применение радиоактивных изотопов) превратило биологию в наиболее бурно развивающуюся отрасль знаний. По мнению экспертов, в XXI веке именно биология и биотехнологии выдвинулись в лидеры естествознания, сменив на этой позиции физику.

Физика – ядро гуманитарного образования. Не являются ли преувеличением слова, ставшие эпиграфом параграфа? Ведь «гуманитарное» – это относящееся к человеческому обществу, к человеку и его культуре. Да и не так редко приходится слышать о «ненужности» физики, о том, что «физика не пригодится мне в жизни, она не важна для меня».

Главная цель физики – выявить законы природы, объяснить, как протекают физические явления, и указать на возможность их практического применения. Это не может не быть важным для человека, являющегося частью природы.

При получении образования вы имеете дело с физикой как с учебным предметом. И здесь физике принадлежит основная роль в формировании научных представлений об окружающем мире. В процессе изучения физики вы знакомитесь с основными методами научного познания природы, характерными для естественных наук (экспериментальных и теоретических); приобретаете умения обрабатывать результаты измерений и на этой основе выявлять зависимости между физическими величинами; знакомитесь с принципами действия отдельных технических устройств; развиваете свои умения ставить и разрешать проблемы. Таким образом, физика, формируя естественнонаучный стиль мышления, понимание потенциальной познаваемости мира, безусловно, является важнейшим элементом общечеловеческой культуры.

Может возникнуть вопрос: «А почему именно физика – ключевое звено гуманитарного образования? А другие естественные науки? Разве своим содержанием они не вносят вклад в развитие и формирование мировоззрения, а значит, в гуманитарное образование?» При поиске своего варианта ответа на подобный вопрос обратите внимание, что физика – наука, изучающая простейшие и вместе с тем наиболее общие закономерности объективного мира. Именно при изучении физики имеется возможность пройти весь цикл познания от непосредственного наблюдения явления к его *экспериментальному изучению*, а далее к *теоретическому осмыслению модели* изучаемого явления, *проверке следствий теории* и *использованию выводов теории на практике*.

Эксперимент. Теория. Практика. Рассмотрим в качестве примера, как формировались научные знания в области тепловых явлений.

При этом использовались различные **научные методы** – **способы получения новых знаний**. С давних времён человек наблюдал тепловые явления: нагревание воды, плавление металлов, горение топлива. Если наблюдение проводится целенаправленно, по заранее продуманному плану, его результат фиксируется, то это *научное наблюдение*. Но осуществляющиеся в то время наблюдения тепловых явлений были наблюдениями качественными, они не сопровождались количественными измерениями.

Новый этап в изучении тепловых явлений наметился в XVII веке. Изобретение термометра позволило перейти к *научным экспериментам*. В отличие от наблюдения в эксперименте (от латинского *experimentum* – проба, опыт) учёный не ограничивается ролью простого наблюдателя происходящих событий. В эксперименте изучаемое явление исследуется в контролируемых управляемых условиях. Именно в эксперименте добываются *научные факты*, являющиеся фактической основой любой науки. Именно опыт, эксперимент является источником *научных знаний*. Именно эксперимент – единственный критерий достоверности *научной истины*, достигнутой нами на современном этапе развития науки.

Как правило, постановке эксперимента предшествует выдвижение *гипотезы* (от греческого *hypothesis* – основание, предположение) о ходе протекания физического явления, о зависимости (или независимости) одной физической величины от другой. Вот как, например, шведский астроном Цельсий описывает опыты по проверке постоянства температуры плавления льда: «Эти опыты я повторял два года, во все зимние месяцы, при различной погоде и разнообразных изменениях состояния барометра и всегда находил точно такую же точку на термометре. Я помещал термометр не только в тающий лёд, но также при сильных холодах приносил снег в мою комнату на огонь до тех пор, пока он не начинал таять. Я помещал также котёл с тающим снегом вместе с термометром в топящуюся печь и всегда находил, что термометр показывал одну и ту же точку, если только снег лежал плотно вокруг шарика термометра». (Одновременно Цельсий исследовал точку кипения воды и установил, что температура кипения воды зависит от величины атмосферного давления.)

Накопленные научные факты, подтверждённые экспериментом гипотезы, работа мысли и воображения учёных позволяют им открыть законы природы. **Закон природы** – наиболее важная существенная неизменная связь между явлениями. Открытый учёными закон природы после его описания на языке науки (формулировка, математическое выражение закона) становится **законом науки**. Как

вы знаете, изучение тепловых явлений привело учёных в дальнейшем к открытию одного из фундаментальных законов – закона сохранения энергии.

Комплекс взглядов и представлений (определения, результаты экспериментов, научные законы), направленных на объяснение какого-либо явления, образует *научную теорию*. Ценность научной теории определяется не только и не столько тем, какой круг известных и исследованных наукой явлений ею объясняется, но теми предсказаниями новых явлений, закономерностей, которые делаются на основе теории. Результаты экспериментальных исследований, развёрнутых с целью подтверждения гипотез, выдвинутых благодаря теории, и определяют судьбу теории. Если эксперименты подтверждают теорию, то она признаётся истинной на данном этапе развития науки.

При изучении какого-либо явления учёные не могут изучить его полностью всесторонне и учесть влияние всех факторов на ход явления. Например, изучается процесс изменения температуры горячей воды с течением времени. При этом вряд ли есть необходимость учитывать изменение формы сосуда, в котором находится вода, за счёт теплового расширения сосуда, незначительные различия в степени очистки воды и т. д. Во внимание будут приняты масса и начальная температура воды, площадь поверхности, с которой происходит испарение воды. Будет учтено, есть ли нет на поверхности воды плёнка масла (вспомните, как долго остывает жирный суп). Таким образом, в естественных науках, в том числе и в физике, фактически *изучаются не реальные, а упрощённые идеализированные объекты – модели*.

Модели бывают *материальные* и *теоретические*. Например, термос – материальная модель теплоизолированной системы – удобен при изучении тепловых явлений. Уменьшенная копия – модель космического корабля – позволяет изучить, как будет нагреваться корпус спускаемого аппарата в плотных слоях земной атмосферы. Теоретическая модель – математические уравнения, описывающие ход того или иного физического процесса, в которых специально сделаны определённые упрощения. Например, при расчёте движения жидкости-теплоносителя по металлической трубе не учитывается, что жидкость вблизи стенки трубы имеет меньшую температуру, чем в центре трубы. В наше время мощным исследовательским инструментом стало компьютерное моделирование. Как и в других случаях, критерием истинности результатов моделирования является сравнение их с экспериментом.

При изучении тепловых явлений первой разработанной и общепринятой теоретической моделью стала модель особой «тепловой

жидкости», которой якобы обмениваются тела при тепловом контакте. На основе такой модели во второй половине XVIII века учёными были введены понятия теплоёмкости вещества, удельной теплоты плавления, были выведены формулы для расчёта температуры, установившейся при смешивании жидкостей в термосе (калориметре). Но, как вам известно, эта модель тепловых явлений не выдержала испытания экспериментом. В конце XVIII века естествоиспытатель граф Румфорд провёл важное наблюдение: при сверлении металла затупленным сверлом выделяется столько тепла, что через 2,5 часа работы вода, в которую были погружены металлическая заготовка и сверло, закипела.



1.1. Можно ли результаты этого опыта объяснить «перетеканием тепловой жидкости»?

Английский химик Хэмфри Дэви смог расплавить лёд трением двух кусков друг о друга.



1.2. Можно ли результаты этого опыта объяснить «перетеканием тепловой жидкости»?

Учёные пришли к выводу, который вам уже известен из курса физики 8 класса: при совершении механической работы увеличивается энергия движения частиц (молекул, атомов), составляющих тело. Происходит превращение кинетической энергии во внутреннюю энергию тел¹. Именно на этих научных понятиях базируется современная научная теория тепловых явлений, основой которой является первый закон термодинамики – закон сохранения энергии, применённый к тепловым процессам.

При этом мы по-прежнему используем введённые ранее понятия: теплоёмкость, удельная теплота плавления и так далее. В этом находит своё отражение один из основных принципов естествознания: новая научная теория не отменяет и не вычёркивает из научного обихода понятия, разработанные предыдущей теорией – новая теория лишь ограничивает и уточняет область их применения, удерживая всё положительное, что было накоплено ранее. Таков процесс познания мира естественными науками – нет абсолютных и вечных истин «в последней инстанции», а есть непрерывное расширение и уточнение наших знаний о пространстве, времени, материи.

¹ Интересно отметить, что за полвека до Румфорда выдающийся русский учёный-энциклопедист Михаил Васильевич Ломоносов в своей работе «Размышления о причине теплоты и холода» обосновывал гипотезу о том, что «теплота состоит во внутреннем движении материи».

Как художники у мольберта, поколения учёных добавляют всё новые и новые краски в научную картину мира, «прорисовывая детали», «оттеняя подробности» и объединяя в единое целое отдельные элементы картины. Иногда какая-то часть картины пишется заново, но прежние слои «краски» не пропадают – они становятся основанием-грунтом, на которое ложатся новые узоры.

Не бесполезен ли труд учёных, если окончательная истина не достижима вчера, сегодня, завтра? Конечно же, нет! Новые научные взгляды, новые научные теории естествознания становятся основой современных технологий, находят своё вещественное воплощение в современных машинах, приборах, становятся теми практическими вещами, которые окружают человека как «вторая природа».

Наука, физика, связь физики с другими науками, роль физики в современном образовании, **научное наблюдение, эксперимент, гипотеза, закон природы и закон науки, теория, модель**, наука и практика.

- 1.1 ● Сравните методы научного познания – наблюдение и опыт.
- 1.2 ● Подготовьте сообщение по теме «Физика и ...», выбрав любую из наук.
- 1.3 ● По одной из возможных классификаций науки подразделяются на естественные, технические и общественные. К какой группе наук при такой классификации, по вашему мнению, относится математика?
- 1.4 ● В книге известного советского и российского физика-теоретика Аркадия Бейнусовича Мигдала «Как рождаются физические теории» описывается следующий эпизод: «В лаборатории, которую возглавлял опытный экспериментатор, изучали, как распределены по энергиям альфа-частицы, вылетающие из ядер, ... экспериментаторы нашли равноотстоящие по энергии группы альфа-частиц ... Этот результат был полной неожиданностью и противоречил существующим представлениям о структуре ядра. ... В самом начале равноотстоящие значения энергии получились случайно, и экспериментаторов так взволновала возможность сделать открытие, что всякий раз, когда выходило по-другому, они проверяли напряжение в сети. Если напряжение отличалось от нормы, результат измерений отбрасывался. ... проверку делали только тогда, когда получался нежелательный результат». Верно ли экспериментаторами проведены измерения в данном эксперименте? Ответ обоснуйте.
- 1.5 ● Не несёт ли дальнейшее развитие науки, в частности физики, угрозы человечеству? Ведь физика – это не только космические полёты, компьютеры, Интернет, лазеры, но и Хиросима, Нагасаки, Чернобыль. По этому поводу Альберт Эйнштейн писал: «Открытие деления урана угрожает цивилизации и людям не более, чем изобретение спички. Судьба мира отныне будет зависеть от моральных устоев человечества, а не от уровня развития науки». Согласны ли вы с мнением Эйнштейна? Обоснуйте свою точку зрения.

§ 2. ИЗМЕРЕНИЯ В ФИЗИКЕ



Мысленные рассуждения произведены бывают из надёжных и много раз повторённых опытов.

Михаил Васильевич Ломоносов (1711–1765), выдающийся русский учёный-энциклопедист

Вы уже знаете, какова роль эксперимента в физике.

Прямые и косвенные измерения. Как вы знаете, основой физических знаний является эксперимент. При проведении физического эксперимента необходимо измерить физические величины, оценить допущенные при измерениях погрешности и, если это нужно, провести расчёты, используя значения величин, измеренных в эксперименте.

Измерение физической величины – операция, которая позволяет с помощью средства измерения установить, во сколько раз измеряемая величина больше или меньше единицы измерения данной величины. Различают два вида измерений: прямые и косвенные измерения. *Прямые измерения* – определение значения физической величины непосредственно средством измерения. Например, измерение температуры термометром, объёма гири с помощью мензурки, силы тока в электрической цепи амперметром, электрического сопротивления резистора прибором омметром и т. д. *Косвенные измерения* – определение значения физической величины как результат расчёта по формуле, связывающей данную величину с другими физическими величинами, чьи значения определены путём прямых измерений. Примеры косвенных измерений: определение объёма комнаты прямоугольной формы путём измерения её длины, ширины и высоты или определение сопротивления резистора путём измерения соответствующих значений электрического напряжения и силы тока.

В физике, как и в любой другой естественной науке, никакое измерение не может быть проведено абсолютно точно, *результат измерения отличается от истинного значения физической величины*. Действительно, при проведении измерения экспериментатор использует средства измерения, которые не являются идеальными (инструментальная погрешность), им допускается определённая ошибка при считывании показаний измерительного прибора (погрешность отсчёта).

Таким образом, целью измерения физической величины является не определение истинного значения величины (это невозможно принципиально!), а установление границ интервала, в котором находится значение величины.

Как же установить границы искомого интервала? Известная русская пословица гласит: «Семь раз отмерь – один раз отрежь». Оказывается, пословица верно отражает важную закономерность, установленную в теории измерений! Если с одинаковой тщательностью провести несколько измерений одной и той же неизменной физической величины, то мы получим численные значения $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$, отличающиеся друг от друга. Вычислим среднее значение величины \bar{A} (черта над символом величины – знак среднего):

$$\bar{A} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_n}{n}, \quad (2.1)$$

где n – число измерений.

В теории измерений доказывается, что чем больше проведено измерений, тем ближе среднее арифметическое значение \bar{A} к истинному значению измеряемой физической величины A . Таким образом, середина искомого интервала установлена, и мы вправе утверждать, что истинное значение измеряемой величины находится в интервале

$$\bar{A} - \Delta A \leq A \leq \bar{A} + \Delta A,$$

где ΔA – абсолютная погрешность измерения.

Абсолютная погрешность измерения – модуль разности результата измерения и истинного значения измеряемой величины.

Как рассчитать погрешности измерений?

Случай прямых измерений. Для расчёта абсолютной погрешности прямого измерения вначале определяют случайные (непредсказуемо изменяющиеся при повторном измерении) отклонения результатов отдельных измерений от среднего арифметического значения величины $|A_1 - \bar{A}|, |A_2 - \bar{A}|, |A_3 - \bar{A}|$ и так далее. Затем приближённо вычисляют *случайную абсолютную погрешность* $\Delta A_{\text{случ}}$ по формуле

$$\Delta A_{\text{случ}} = \frac{|A_1 - \bar{A}| + |A_2 - \bar{A}| + |A_3 - \bar{A}| + |A_n - \bar{A}|}{n}. \quad (2.2)$$

Далее необходимо учесть *систематическую абсолютную погрешность* $\Delta A_{\text{сист}}$. Систематическая (неизменная при повторных измерениях) погрешность обусловлена в основном качеством используемого измерительного средства. При использовании школьного оборудова-

ния систематическую абсолютную погрешность в большинстве случаев приближённо можно считать равной половине цены деления шкалы измерительного прибора.

Таким образом, абсолютная погрешность прямого измерения равна

$$\Delta A = \Delta A_{\text{случ}} + \Delta A_{\text{сист}}. \quad (2.3)$$

Расчёт абсолютной погрешности не даёт полного представления о качестве проведённого измерения. Рассмотрим пример. Пусть с помощью измерительной ленты измерена длина стола L и получен результат

$$L = (123,6 \pm 0,6) \text{ см.}$$



2.1. Чему равно среднее арифметическое значение длины стола L ?

Чему равна абсолютная погрешность измерения длины стола ΔL ?

В каком интервале находится истинное значение длины стола?

С помощью инструментальной стальной линейки измерена толщина книги d и получен результат

$$d = (17,5 \pm 0,4) \text{ мм.}$$



2.2. Чему равно среднее арифметическое значение толщины книги?

Чему равна абсолютная погрешность измерения толщины книги?

В каком интервале находится истинное значение толщины книги?

На первый взгляд кажется, что измерение толщины учебника произведено более качественно – ведь абсолютная погрешность этого измерения составляет всего 0,4 мм. Однако прежде чем делать окончательный вывод, сравним, какую долю (в процентах) составляет абсолютная погрешность измерения от среднего арифметического значения измеренной величины в каждом из рассматриваемых случаев. Обозначим эту долю ε (ε – буква греческого алфавита, читается: эпсилон).

$$\varepsilon_L = \frac{0,6}{123,6} \cdot 100 \% = 0,5 \%,$$

$$\varepsilon_d = \frac{0,4}{17,5} \cdot 100 \% = 2 \%.$$

Введём определение. *Относительная погрешность измерения – отношение абсолютной погрешности измерения к среднему арифметическому значению измеренной величины.* Абсолютная погрешность ε измеряется в процентах или в долях единицы.

$$\varepsilon_A = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100 \%, \quad \varepsilon_A = \frac{\Delta A}{A}. \quad (2.4)$$

Сравнение относительной погрешности измерений позволяет сделать вывод, какое из измерений проведено более качественно (более точно).



2.3. Сравните качество измерения длины стола и толщины книги.

С учётом понятия «относительная погрешность измерения» результат измерения принято записывать в виде

$$A = \bar{A} \pm \Delta A,$$

$$\varepsilon = \dots \%$$

Случай косвенных измерений. Теперь выясним, как провести расчёт абсолютной погрешности в случае косвенного измерения. Пусть некоторая физическая величина D рассчитывается по формуле, в которую входят значения физических величин A , B , C и так далее, определённые путём прямых измерений:

$$D = f(A, B, C).$$

1. Вначале вычисляется среднее значение величины:

$$\bar{D} = f(\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}).$$

2. Далее вычисляется относительная погрешность косвенного измерения по формулам, приведённым в таблице 1. (Формулы в таблице 1 – справочный материал, запоминать эти формулы не нужно.)

Таблица 1. Формулы для вычисления относительной погрешности косвенных измерений

Формула, связывающая данную величину с другими	Формула для вычисления относительной погрешности
$D = ABC$	$\varepsilon_D = \varepsilon_A + \varepsilon_B + \varepsilon_C$
$D = \frac{AB}{C}$	$\varepsilon_D = \varepsilon_A + \varepsilon_B + \varepsilon_C$
$D = A\sqrt{\frac{B}{C}}$	$\varepsilon_D = \varepsilon_A + \frac{1}{2}\varepsilon_B + \frac{1}{2}\varepsilon_C$
$D = \frac{AB^2}{C^2}$	$\varepsilon_D = \varepsilon_A + 2\varepsilon_B + 2\varepsilon_C$

3. Затем используется формула (2.4), определяющая относительную погрешность, и вычисляется относительная погрешность косвенного измерения.

$$\varepsilon_D = \frac{\Delta D}{\bar{D}},$$

следовательно,

$$\Delta D = \varepsilon_D \cdot \bar{D}.$$

4. Записывается результат косвенного измерения в виде

$$D = \bar{D} \pm \Delta D,$$

$$\varepsilon_D = \dots \text{ \%}.$$

Примеры расчёта погрешности измерений.

Пример 1. Штангенциркулем измерили пять раз длину металлического стержня H :

H , мм	127,3	127,4	127,2	127,3	127,2
----------	-------	-------	-------	-------	-------

Какое значение длины стержня получено в результате измерения? Систематическую относительную погрешность принять равной 0,05 мм.

$$\Delta H_{\text{сист}} = 0,05 \text{ мм}.$$

Решение:

1. Вычислим среднее значение длины стержня [формула (2.1)].

$$H = \frac{127,3 + 127,4 + 127,2 + 127,3 + 127,2}{5} = 127,3 \text{ (мм)}.$$

2. Вычислим случайную абсолютную погрешность измерения длины стержня [формула (2.2)].

$$\Delta H_{\text{случ}} = (|127,3 - 127,3| + |127,4 - 127,3| + |127,2 - 127,3| + |127,3 - 127,3| + |127,2 - 127,3|) / 5,$$

$$\Delta H_{\text{случ}} = 0,06 \text{ (мм)}.$$

3. Вычислим абсолютную погрешность измерения длины стержня [формула (2.3)].

$$\Delta H = 0,06 \text{ мм} + 0,05 \text{ мм} = 0,11 \text{ мм},$$

$$\Delta H = 0,1 \text{ мм}.$$

4. Проведём расчёт относительной погрешности измерения длины стержня [формула (2.4)].

$$\varepsilon_H = \frac{0,1 \text{ мм}}{127,3 \text{ мм}} \cdot 100 \% = 0,08 \text{ \%}.$$

5. Запишем результат прямого измерения длины стержня.

$$H = (127,3 \pm 0,1) \text{ мм}, \quad \varepsilon = 0,08 \text{ \%}.$$



2.4. Укажите границы интервала, в котором находится истинное значение длины стержня.

Пример 2. Для определения электрической мощности P , выделяющейся на резисторе, включённом в электрическую цепь, схема которой изображена на рисунке 1, были измерены сопротивление резистора R и сила тока в цепи I .

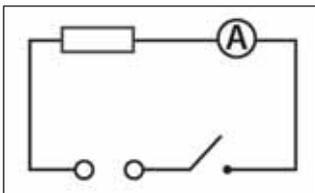


Рис. 1

$$R = (1,6 \pm 0,1) \text{ Ом},$$

$$I = (1,8 \pm 0,1) \text{ А}.$$

Какое значение мощности получено в результате проведения данного косвенного измерения?

Решение:

Электрическая мощность P , выделяющаяся на резисторе сопротивлением R при прохождении через него тока, определяется выражением

$$P = I^2 R,$$

где I – сила тока, протекающего через резистор.

1. Вычислим среднюю мощность \bar{P} .

$$\bar{P} = \bar{I}^2 \bar{R},$$

$$\bar{P} = (1,8)^2 \cdot 1,6 = 5,2 \text{ (Вт)}.$$

2. Вычислим относительную погрешность косвенного измерения мощности ε_P . Соответствующую формулу находим в таблице 1.

$$\varepsilon_P = 2\varepsilon_I + \varepsilon_R,$$

или

$$\varepsilon_P = 2 \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta R}{R},$$

$$\varepsilon_P = 2 \cdot \frac{0,1}{1,8} + \frac{0,1}{1,6},$$

$$\varepsilon_P = 0,11 + 0,06,$$

$$\varepsilon_P = 0,17,$$

$$\varepsilon_P = 17 \text{ \%}.$$



2.5. Как видно, качество измерения электрической мощности недостаточно высокое. Измерение какой из величин – силы тока или сопротивления – вносит больший «вклад» в погрешность измерения электрической мощности? Точность измерения какой из величин – силы тока или сопротивления – следует повысить в первую очередь?

3. Вычислим абсолютную погрешность косвенного измерения мощности [формула (2.4)].

$$\varepsilon_P = \frac{\Delta P}{P},$$

$$\Delta P = \varepsilon_P \cdot \bar{P},$$

$$\Delta P = 0,17 \cdot 5,2 = 0,9 \text{ (Вт)}.$$

4. Запишем результат косвенного измерения электрической мощности.

$$P = (5,2 \pm 0,9) \text{ Вт},$$

$$\varepsilon = 17 \text{ \%}.$$



2.6. Укажите границу интервала, в котором находится истинное значение электрической мощности, выделяющейся на резисторе.

Лабораторная работа «Определение времени двигательной реакции».

Оборудование: линейка длиной около 30 см с миллиметровыми делениями.

Время двигательной реакции – время, необходимое человеку для совершения некоторого действия в изменившейся обстановке: нажатие на сигнальную кнопку при включении источника звука, нажатие на педаль тормоза автомобиля при смене светового сигнала светофора и т. д.

В данной работе вам необходимо определить время реакции на возникшее движение линейки, после того как её отпустит ваш ассистент. Первоначально ассистент держит линейку в вертикальном положении, а вы располагаете руку так, чтобы нулевая отметка линейки находилась между большим и указательным пальцами. Ассистент внезапно без предупреждения отпускает линейку, вы ловите её и таким образом измеряете расстояние, пройденное линейкой.

Если не учитывать сопротивление воздуха, то линейка свободно падает – движется равноускоренно под действием силы тяжести с ускорением \vec{a} , равным ускорению свободного падения \vec{g} .

$$\vec{a} = \vec{g},$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2.$$

Проекция перемещения тела при его равноускоренном движении определяется следующим образом:

$$S = v_0 t + \frac{at^2}{2},$$

где v_0 – проекция начальной скорости;

t – время движения.

Учтём, что начальная скорость тела (линейки) равна нулю, а ускорение линейки равно ускорению свободного падения.

Тогда

$$S = \frac{gt^2}{2}.$$

Так как время движения линейки и есть время двигательной реакции, то время двигательной реакции легко определить.

$$t = \sqrt{\frac{2S}{g}}.$$



2.7. К какому виду измерений – прямому или косвенному – относится измерение проекции перемещения линейки в данной работе?



2.8. К какому виду измерений – прямому или косвенному – относится определение времени двигательной реакции в данной работе?

Указания к работе:



Задание 1.

1.1. Проведите 5–7 раз измерение проекции перемещения линейки S . Вычислите среднее арифметическое значение проекции перемещения линейки \bar{S} .

Вычислите случайную абсолютную погрешность измерения проекции перемещения линейки $\Delta S_{случ}$.

Вычислите абсолютную погрешность измерения проекции перемещения линейки ΔS . (Примечание. В данной работе систематическая абсолютная погрешность $\Delta S_{сист}$ существенно меньше случайной абсолютной погрешности $\Delta S_{случ}$. Поэтому $\Delta S_{сист}$ при расчётах абсолютной погрешности можно пренебречь.)

Вычислите относительную погрешность измерения проекции перемещения линейки ε_S .

Запишите результат прямого измерения проекции перемещения линейки в виде

$$S = \bar{S} \pm \Delta S,$$

$$\varepsilon_S = \dots \%$$

Задание 2.

2.1. Определите среднее время двигательной реакции.

$$\bar{t} = \sqrt{\frac{2\bar{S}}{g}}.$$

(Численное значение \bar{S} вами определено при выполнении задания 1 работы, $\bar{g} = 9,8 \text{ м/с}^2$ – справочное значение ускорения свободного падения.)

2.2. Используя таблицу 1, запишите формулу для расчёта относительной погрешности косвенного измерения времени ε_t :

$$\varepsilon_t = \frac{1}{2} \varepsilon_S + \frac{1}{2} \varepsilon_g$$

или

$$\varepsilon_t = \frac{1}{2} \frac{\Delta S}{\bar{S}} + \frac{1}{2} \frac{\Delta g}{\bar{g}}.$$



2.9. Значения всех ли величин, указанных в последней формуле, вам известны?

В последней формуле Δg – абсолютная погрешность измерения ускорения свободного падения. Чему же она равна? В данной работе мы используем справочное значение ускорения свободного падения. Для справочных значений физических величин существует следующее правило: *абсолютная погрешность справочного значения величины равна половине единицы последнего разряда в численном значении величины.*

$$\bar{g} = 9,8 \text{ м/с}^2.$$

Последним разрядом в численном значении величины является разряд десятых. Единица этого разряда 0,1.

Следовательно,

$$\Delta g = \frac{0,1 \text{ м/с}^2}{2},$$

$$\Delta g = 0,05 \text{ м/с}^2.$$

2.3. Проведите расчёт ε_t .

2.4. Вычислите абсолютную погрешность косвенного измерения времени двигательной реакции.

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta t}{\bar{t}},$$

следовательно,

$$\Delta t = \varepsilon_t \cdot \bar{t}.$$

2.5. Запишите результат косвенного измерения времени двигательной реакции в виде

$$t = \bar{t} \pm \Delta t,$$

$$\varepsilon_t = \dots \%$$

Задание 3. Сравните время двигательной реакции правой и левой руки.

Прямые и косвенные измерения, абсолютная погрешность прямого измерения, относительная погрешность прямого измерения, форма записи результата измерения, относительная погрешность косвенного измерения, абсолютная погрешность косвенного измерения.

2.1 ● Всякий раз, полностью погружая в воду алюминиевую деталь, прикреплённую к лабораторному динамометру, ученик определяет архимедову силу, действующую на деталь. Им были получены следующие результаты:

$F_{\text{арх}}, \text{ Н}$	1,3	1,5	1,3	1,4	1,5
-----------------------------	-----	-----	-----	-----	-----

Запишите результат измерения архимедовой силы. Систематическую абсолютную погрешность измерения архимедовой силы принять равной 0,1 Н.

2.2 ● Для того чтобы определить сопротивление спирали электрической лампы накаливания, были измерены напряжение на лампе $U = (4,0 \pm 0,2) \text{ В}$ и сила тока $I = (0,25 \pm 0,03) \text{ А}$. Какое значение сопротивления спирали лампы получено в опыте? (Подсказка. Воспользуйтесь формулой закона Ома для участка цепи.)

2.3 ● При расчёте численного значения косвенно измеренной величины вам необходимо использовать число π .

$$\pi = 3,14.$$

Чему равна абсолютная погрешность числа π ?

Чему равна относительная погрешность числа π ?

2.4 ● С целью повышения качества измерения вы, используя одну и ту же измерительную ленту, измеряете высоту каждого из десяти столов в учебном кабинете, а затем вычисляете среднее арифметическое значение высоты. Верно ли была организована вами процедура измерения? Ответ обосновать.

2.5 ● Вам необходимо как можно точнее измерить массу драгоценного украшения. Для этого вы измеряете его массу на пяти разных весах, а затем вычисляете среднее арифметическое значение массы. Верно ли вами была организована процедура измерения? Ответ обосновать.

Раздел 1. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

В этом разделе вы выясните основные особенности внутреннего строения газов, жидкостей и твёрдых тел, условия, при которых возможны их превращения. Вы познакомитесь с тем, как простейшая физическая модель позволяет получать солидные научные результаты. Именно в этом разделе при изучении основных понятий термодинамики в физике прозвучит слово «вероятность» и вы узнаете, почему реальные тепловые процессы – «улица с односторонним движением».



Вспомните, что вам известно о внутреннем строении газов, жидкостей и твёрдых тел, о тепловом движении и температуре. Вспомните, что называют внутренней энергией и количеством теплоты, как формулируется первый закон термодинамики и какие вам известны физико-математические соотношения для расчёта количества теплоты в различных тепловых процессах.

§ 3. Основные положения молекулярно-кинетической теории

Основные положения молекулярно-кинетической теории

Моль – единица количества вещества

Примеры решения задач

§ 4. Молекулярно-кинетическая теория идеального газа. Температура

Модель идеального газа

Температура

Распределение молекул по энергиям

Давление идеального газа

§ 5. Уравнение состояния идеального газа

Уравнение состояния идеального газа

Изопроцессы

Примеры решения задач

§ 6. Лабораторная работа «Изучение изобарного процесса»

§ 7. Реальные газы. Влажность воздуха. Кипение

Реальные газы

Испарение. Насыщенный пар

Влажность воздуха

Практическая работа

«Измерение относительной влажности воздуха»

Кипение

§ 8. Поверхностное натяжение

Поверхностное натяжение

Лабораторная работа

«Определение поверхностного натяжения»

Явления смачивания и несмачивания
Капиллярные явления

§ 9. Твёрдые тела

Кристаллы
Лабораторная работа
«Наблюдение процесса роста кристаллов»
Роль дефектов в кристаллах
Жидкие кристаллы
Аморфные тела
Полимеры

§ 10. Упругие свойства твёрдых тел

Закон Гука
Предел прочности
Лабораторная работа
«Определение предела прочности металла»

§ 11. Первый закон термодинамики

Внутренняя энергия
Работа в термодинамике
Количество теплоты
Первый закон термодинамики
Адиабатный процесс

§ 12. Решение задач по теме «Первый закон термодинамики»

Задачи на первый закон термодинамики
Лабораторная работа
«Определение удельной теплоты плавления льда»

§ 13. Второй закон термодинамики

Необратимость тепловых явлений
Второй закон термодинамики
Тепловые двигатели
Примеры решения задач

Самое важное в разделе «Молекулярная физика»

P. S.

§ 3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ



Если в результате какой-то мировой катастрофы все накопленные знания оказались бы уничтоженными и к грядущим поколениям живых существ перешла бы только одна фраза, то какое утверждение, составленное из наименьшего количества слов, принесло бы наибольшую информацию? Я считаю, что это атомная гипотеза...

*Ричард Фейнман (1918–1988),
выдающийся американский физик-теоретик,
лауреат Нобелевской премии*

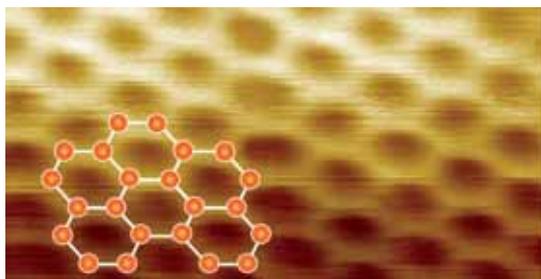
Вам уже известно об атомно-молекулярном строении вещества.

Основные положения молекулярно-кинетической теории.

Сформулировать основные положения молекулярно-кинетической теории (МКТ) строения вещества не составляет труда: все тела состоят из частиц (атомов, молекул, ионов), которые находятся в беспорядочном движении и взаимодействуют между собой, притягиваясь или отталкиваясь в зависимости от расстояния между частицами. Как вам известно, в наше время нет необходимости обосновывать эти утверждения – они перешли в разряд научных фактов.

С середины XX века в распоряжении учёных имеются электронные микроскопы, которые позволяют получать изображения молекулярных структур и даже отдельные фрагменты атома (рис. 2).

Рис. 2. Изображения отдельных атомов углерода (показаны жёлтым цветом), составляющих графен. Графен – модификация углерода, образованная однослойным расположением атомов углерода, образующих двумерную кристаллическую решётку



Установлен характер движения частиц. В твёрдых телах, вещество которых, как правило, находится в кристаллическом состоянии, частицы колеблются около определённых точек – положения равновесия, узлов кристаллической решётки. В жидкостях частицы, колеблясь, время от времени совершают перескоки на свободные

места в структуре жидкости. В газах атомы и молекулы, находясь на значительном расстоянии друг от друга, беспорядочно движутся, ударяясь о стенки баллона, в котором находится газ, и сталкиваясь друг с другом. Одним из прямых доказательств беспорядочного движения частиц является диффузия – явление взаимного перемешивания беспорядочно движущихся частиц соприкасающихся веществ. Диффузия, как вам известно, происходит и в газах, и в жидкостях, и в твёрдых телах.



3.1. Приведите примеры явления диффузии.

Взаимодействием частиц объясняется, например, возникновение силы упругости при деформации твёрдых тел, практическая несжимаемость жидкостей благодаря силам межмолекулярного отталкивания и возможность перехода любого газа в жидкое состояние при его сжатии и охлаждении.

Моль – единица количества вещества. Из курса физики 7-го класса вам известно, что атомы крайне малы, их размер – порядка одной стомиллионной доли сантиметра. Представьте, что атомы увеличили до размеров буквы типографского шрифта, которым напечатан этот учебник. Тогда буква стала бы в несколько раз выше Эвереста – высочайшей горной вершины на Земле.

Ясно, что при таких микроскопических размерах частиц их число должно быть колоссально. Возьмём, к примеру, каплю воды объёмом 1 мм^3 (как видите, объём воды невелик). Предположим, что эту каплю каждую секунду покидает $1\,000\,000\,000$ молекул воды безвозвратно. Сколько же времени потребуется для полного испарения капли? Ответ ошеломляет: потребуется более тысячи лет! Для того чтобы подчеркнуть, что при рассмотрении тепловых процессов мы имеем дело с телами, содержащими огромное число молекул, такие тела называют *макроскопическими телами*.



3.2. Может ли песчинка быть отнесена к макроскопическим телам?

Если тела содержат большое число молекул, то крайне неудобно считать молекулы «поштучно», оперировать числами, содержащими десятки нулей. По этой причине введена единица измерения количества вещества – моль. *В одном моле содержится столько частиц, сколько атомов содержится в 12 г изотопа углерода ^{12}C .* Число частиц в одном моле определено, оно оказалось равно $6,02 \cdot 10^{23}$. Эта величина получила название **постоянная Авогадро** в честь итальянского физика и химика Амедео Авогадро (1776–1856).

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}.$$

Знание постоянной Авогадро позволяет рассчитать количество вещества ν (читается: ню).

$$\nu = \frac{N}{N_A}, \quad (3.1)$$

где N – число частиц макроскопического тела.

Какое бы вещество мы ни взяли – воду, кислород, железо – число частиц вещества (атомов, молекул, ионов) в одном моле любого вещества будет одинаково и равно постоянной Авогадро. Но масса одного моля разных веществ будет, очевидно, неодинакова. **Молярная масса вещества – масса вещества, взятого в количестве одного моля.** Молярную массу вещества можно определить, если воспользоваться периодической системой химических элементов Дмитрия Ивановича Менделеева. Рядом с символом каждого химического элемента указана его относительная атомная масса M_r (r – сокращённо от латинского *relativus* – относительный).

Например:

$$\begin{aligned} M_r(\text{H}) &= 1,00794 \approx 1, \\ M_r(\text{C}) &= 12,011 \approx 12, \\ M_r(\text{N}) &= 14,0067 \approx 14, \\ M_r(\text{O}) &= 15,994 \approx 16, \\ M_r(\text{Ca}) &= 40,078 \approx 40. \end{aligned}$$

Численное значение молярной массы M в граммах на моль равно относительной атомной массе M_r , то есть

$$\begin{aligned} M(\text{H}) &= 1 \text{ г/моль}, \\ M(\text{C}) &= 12 \text{ г/моль}, \\ M(\text{N}) &= 14 \text{ г/моль}, \\ M(\text{O}) &= 16 \text{ г/моль}, \\ M(\text{Ca}) &= 40 \text{ г/моль}. \end{aligned}$$

Нетрудно рассчитать и молярную массу химических веществ.

Например:

$$\begin{aligned} M(\text{H}_2\text{O}) &= 2 \cdot 1 + 16 = 18 \text{ (г/моль)}, \\ M(\text{CO}_2) &= 12 + 2 \cdot 16 = 44 \text{ (г/моль)}, \\ M(\text{N}_2) &= 2 \cdot 14 = 28 \text{ (г/моль)}. \end{aligned}$$

Если известна молярная масса вещества, то не составит труда определить количество вещества по формуле

$$\nu = \frac{m}{M}, \quad (3.2)$$

где m – масса вещества.

Знание молярной массы вещества позволяет провести расчёт массы *одной* молекулы вещества. В моле любого вещества массой M содержится одно и то же число частиц вещества, равное постоянной Авогадро N_A . Обозначим массу одной молекулы вещества как m_0 , тогда

$$m_0 = \frac{M}{N_A}. \quad (3.3)$$

Примеры решения задач.

Задача 1. Кусочек школьного мела имеет массу $m = 14$ г. Сколько молекул в кусочке мела?

Решение:

Мел – это карбонат кальция (CaCO_3). Определим его молярную массу.

$$M(\text{CaCO}_3) = 40 + 12 + 3 \cdot 16 = 100 \text{ (г/моль.)}$$



3.3. Оцените, больше или меньше постоянной Авогадро число молекул в кусочке мела.

Воспользуемся пропорцией:

$$\frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}.$$

Тогда

$$N = \frac{m N_A}{M},$$

$$N = \frac{14 \text{ г} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{МОЛЬ}}}{100 \frac{\text{г}}{\text{МОЛЬ}}} = 8,4 \cdot 10^{22}.$$

Ответ: $N = 8,4 \cdot 10^{22}$.



3.4. Сколько молекул мела останется в среднем на классной доске после решения одной задачи по физике, если такого кусочка мела хватает на решение ста задач?

Задача 2. Чему равна концентрация кислорода при нормальных условиях?

Решение:

Напомним определение понятия концентрации, применяемое в физике. **Концентрация – это количество частиц в единице объёма.** Если обозначить концентрацию как n , то

$$n = \frac{N}{V}, \quad (3.4)$$

где N – число частиц вещества;
 V – объём.

Итальянский физик и химик Амедео Авогадро установил, что при нормальных условиях объём 1 моля газа равен 22,4 л.

$$V_1 = 22,4 \text{ л},$$

$$V_1 = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Напомним формулу (3.1) для расчёта количества вещества:

$$v = \frac{N}{N_A}.$$

Отсюда

$$N = vN_A.$$

Тогда соотношение (3.4) запишется в виде

$$n = \frac{vN_A}{V_1},$$

$$n = \frac{1 \text{ моль} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}}{22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3} = 2,69 \cdot 10^{25} \frac{1}{\text{м}^3}.$$

Ответ: $n = 2,69 \cdot 10^{25} \frac{1}{\text{м}^3}.$

Задача 3. Определите массу одного атома меди и концентрацию атомов. Медь находится в твёрдом состоянии при температуре 20 °С, её плотность при этом составляет 8900 кг/м³.

Решение:

Массу одного атома определим, воспользовавшись формулой (3.3):

$$m_0 = \frac{M}{N_A}.$$



3.5. Чему равна молярная масса меди?

$$m_0 = \frac{63,5 \frac{\text{г}}{\text{моль}}}{6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}} = 1,05 \cdot 10^{-22} \text{ г},$$

$$m_0 = 1,05 \cdot 10^{-25} \text{ кг}.$$



3.6. Что характеризует физическая величина плотность?

Плотность вещества ρ определяется соотношением

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3.5)$$

где m – масса вещества;

V – объём вещества.

Масса некоторого объёма вещества определяется, очевидно, массой одной частицы вещества и числом частиц вещества в данном объёме. Иными словами:

$$m = m_0 N,$$

где N – число частиц вещества.

Тогда формула (3.5) для расчёта плотности примет вид

$$\rho = \frac{m_0 N}{V}. \quad (3.6)$$

Вспомним формулу, определяющую концентрацию

$$n = \frac{N}{V},$$

и запишем соотношение (3.6) в виде

$$\rho = m_0 n.$$

Отсюда окончательно имеем

$$n = \frac{\rho}{m_0},$$

$$n = \frac{8900 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}}{1,05 \cdot 10^{-25} \text{ КГ}} = 8,4 \cdot 10^{28} \frac{1}{\text{М}^3}.$$

Ответ: $m_0 = 1,05 \cdot 10^{-25}$ кг;

$$n = 8,4 \cdot 10^{28} \frac{1}{\text{М}^3}.$$

Основные положения молекулярно-кинетической теории, макроскопическое тело, моль, постоянная Авогадро, $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{МОЛЬ}}$, молярная масса, количество вещества $\nu = \frac{N}{N_A}$, $\nu = \frac{m}{M}$, масса молекулы $m_0 = \frac{M}{N_A}$, концентрация $n = \frac{N}{V}$, плотность вещества $\rho = \frac{m}{V}$, $\rho = m_0 n$.

3.1 ● В баллоне объёмом 2 л под высоким давлением находится кислород. Плотность кислорода 0,21 г/см³. Чему равны молярная масса кислорода, масса газа в баллоне, количество молей газа, число молекул кислорода и концентрация газа в баллоне? Вычислите массу молекулы кислорода.



3.2 На поверхности металла методом вакуумного напыления создают слой серебра. Какова масса серебряного слоя, если было осаждено $3 \cdot 10^{19}$ атомов?

3.3 ● Подтвердите расчётом указанное в учебнике время испарения капли воды (см. стр. 28).

3.4 ● Оцените плотность ядерного вещества, исходя из того, что радиус ядра изотопа урана-235 составляет $7,6 \cdot 10^{-15}$ м. (Примечание. Объём сферы рассчитывается по формуле

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3,$$

где r – радиус сферы.)

3.5 ● Вообразите, что в Чёрное море вы бросили крупинку поваренной соли массой 10 мг. Сколько ионов натрия из этой крупинки соли оказалось бы в стакане воды, зачерпнутой из моря, если считать, что соль, растворившись, равномерно распределилась во всём объёме воды?

§ 4. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА. ТЕМПЕРАТУРА



В искусстве так же, как в науке, нужно знать, чем можно пренебречь.

Исаак Яковлевич Померанчук (1913–1966), советский физик-теоретик, академик

Вам уже известно, что непрерывное движение частиц тела называют тепловым движением.

Модель идеального газа. Во второй половине XIX века учёные-физики, опираясь на результаты экспериментов и выдвинув ряд гипотез, сформулировали основные положения молекулярно-кинетической теории. Развитие этой теории, как и любой другой физической теории, шло в направлении предсказания новых физических эффектов – следствий данной теории, выработки путей их экспериментальной проверки. На основе молекулярно-кинетической теории учёными проанализированы свойства твёрдых тел, жидкостей и газов. Наиболее простой ситуацией в МКТ является рассмотрение свойств газов. Обоснуем это утверждение расчётом.

Если при нормальных условиях 1 моль газа занимает объём 22,4 л, то какой объём V приходится в среднем на одну молекулу газа?

$$V = \frac{22,4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}}{6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}} = 3,72 \cdot 10^{-26} \text{ м}^3,$$

$$V = 37,2 \cdot 10^{-27} \text{ м}^3.$$

Чему равно ребро куба l , имеющего такой объём?

$$V = l^3.$$

Тогда

$$l = \sqrt[3]{V},$$

$$l = \sqrt[3]{37,2 \cdot 10^{-27} \text{ м}^3} = 3,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}.$$

Сравним это расстояние с радиусом, например, молекулы азота, он равен $r_0 \approx 0,2 \cdot 10^{-9} \text{ м}$.

Мы видим, что расстояние между молекулами значительно больше их размеров. В такой ситуации силы взаимодействия между молекулами малы и ими можно пренебречь (не учитывать).

Если размер молекулы r_0 в десятки раз (10^1) меньше среднего расстояния l между молекулами, то объём, занимаемый молекулой, в тысячи раз (10^3) меньше «пустого» пространства, приходящегося в среднем на одну молекулу. Следовательно, можно также не учитывать размеры молекул, представляя их материальными точками – телами, размерами которых можно пренебречь при анализе рассматриваемого движения.

Таким образом, вместо реального газа, между молекулами которого существуют силы взаимодействия и молекулы которого занимают некоторый объём баллона, предлагается рассматривать его *модель – идеальный газ*.

Идеальный газ – это система из огромного числа молекул – материальных точек, которые непрерывно и хаотично движутся, не взаимодействуя с другими молекулами и стенками баллона, кроме моментов их упругих столкновений.

Молекулярно-кинетическая теория идеального газа позволила получить ряд теоретических зависимостей, которые в дальнейшем прошли экспериментальную проверку. Это позволило сделать вывод, что в обычных условиях (давление газа не является сверхвысоким, температура газа не является сверхнизкой) свойства реальных газов могут быть вполне успешно объяснены в рамках модели «идеальный газ».

Температура. Рассмотрение МКТ идеального газа начнём с изучения фундаментальной физической величины – температуры. Результаты множества наблюдений и опытов подтверждают факт, известный вам из курса физики 7-го и 8-го классов: молекулы одного и того же вещества в зависимости от условий могут двигаться с различной скоростью, обладать различной кинетической энергией. Вспомните, например, что процессы диффузии могут протекать с различной быстротой. Как вам известно, непрерывное беспорядочное движение молекул тела характеризуется физической величиной *температурой*, а само движение частиц вещества называют **тепловым движением**.

Для измерения температуры существуют различные температурные шкалы. Так, например, привычная для нас шкала Цельсия основывается на двух точках – температуре плавления льда ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$) и температуре кипения воды при нормальном атмосферном давлении ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$). По шкале Фаренгейта за ноль принята температура замерзания смеси воды, льда и нашатыря, а за $100\text{ }^{\circ}\text{F}$ – нормальная температура человеческого тела. Как видите, в этих шкалах выбор начала отсчёта достаточно произволен. Но если температура – это величина, которая определяется интенсивностью движения молекул тела, то, с точки зрения физики, в качестве начала отсчёта температуры разумно взять тот предел, при котором тепловое движение полностью прекратится. И более низкой температуры быть не может – ведь теплового движения частиц уже нет.

Наименьшая возможная температура называется абсолютным нулём температуры.

Шкала температур, в которой за нулевую температуру принят абсолютный нуль температур, называется *абсолютной шкалой температур*. Эта шкала температур была предложена английским физиком Уильямом Томсоном (1824–1907), которому за научные заслуги был присвоен титул лорда Кельвина. Поэтому абсолютная шкала температур также называется **шкалой Кельвина**.

Единица измерения абсолютной температуры называется кельвин (сокращённо обозначается К).

Обозначим абсолютную температуру как T , а температуру по шкале Цельсия как t . Тогда формула, позволяющая рассчитать абсолютную температуру, если известна температура по шкале Цельсия, как установлено учёными, выглядит следующим образом:

$$T = t + 273. \quad (4.1)$$

Абсолютный нуль температур – это 0 К. Тогда значение абсолютного нуля температур по шкале Цельсия равно

$$t = -273 \text{ }^\circ\text{C}.$$



4.1. Чему равна комнатная температура (20 °С) по абсолютной шкале температур?



4.2. Чему равна температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении по шкале Кельвина?



4.3. Температура увеличилась на 10 °С. Чему равно при этом увеличение абсолютной температуры?

Учёными установлено, что абсолютная температура T прямо пропорциональна средней энергии поступательного движения молекулы идеального газа \bar{E} :

$$T \sim \bar{E}.$$

Математически данную зависимость принято записывать в следующем виде:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT, \quad (4.2)$$

где k – коэффициент пропорциональности, называемый постоянной Больцмана,

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$



4.4. Как рассчитывается кинетическая энергия поступательно движущегося тела?

Соотношение (4.2) позволяет рассчитать скорость движения молекулы идеального газа.

$$\bar{E} = \frac{m_0 v^2}{2},$$

тогда с учётом (4.2) имеем

$$\frac{m_0 v^2}{2} = \frac{3}{2} kT.$$

Отсюда

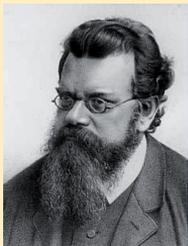
$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$$

Массу молекулы вычислить несложно [см. формулу (3.3)]:

$$m_0 = \frac{M}{N_A}.$$

Окончательно имеем

$$v = \sqrt{\frac{3kN_A T}{M}}.$$



Людвиг Больцман (1844–1906). Великий австрийский физик-теоретик. Один из создателей молекулярно-кинетической теории. Дал теоретическое обоснование ряда основных положений термодинамики. Вывел закон излучения (закон Стéфана-Больцмана).

Скорость, определяемая по данной формуле, называется средней квадратичной скоростью (квадратный корень из среднего квадрата скорости теплового движения молекул). Средняя квадратичная скорость – одна из характеристик скорости теплового движения молекул.

Проведём расчёт скорости движения молекул, например, для молекул азота при комнатной температуре:

$$v = \sqrt{\frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}} \cdot 293 \text{ К}}{0,028 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}},$$

$$v = 510 \text{ м/с.}$$

Действия с единицами измерений:

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\frac{\frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot \frac{1}{\text{моль}} \cdot \text{К}}{\frac{\text{кг}}{\text{моль}}}} = \sqrt{\frac{\frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot \frac{1}{\text{моль}} \cdot \text{К} \cdot \text{моль}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{Дж}}{\text{К}}} = \sqrt{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг}}} = \\ &= \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}}{\text{кг}}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}. \end{aligned}$$

Средняя квадратичная скорость поступательного движения молекул оказалась существенно больше, например, скорости пули, выпущенной из пистолета. Не вызывает ли сомнение полученный результат? Ведь, к примеру, явление диффузии в газах – распространение запахов, – обусловленное движением молекул, происходит со значительно меньшей скоростью. Во-первых, необходимо учесть, что молекулы движутся беспорядочно, беспрестанно сталкиваясь с другими молекулами, и в итоге перемещаются по запутанной ломаной траектории.

Во-вторых, в двадцатых годах XX века скорости молекул были измерены непосредственно в экспериментах и результаты оказались в согласии с теоретическими расчётами, проведёнными на основе молекулярно-кинетической теории.



Распределение молекул по энергиям. При хаотическом (беспорядочном) движении молекул газа происходят беспрестанные столкновения молекул друг с другом. Расчёты показывают, что при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении молекула кислорода, входящая в состав воздуха, испытывает 7 млрд ударов в секунду! При столкновении с другими молекулами газа молекула изменяет величину и направление своей скорости, свою кинетическую энергию. Какими же будут энергии молекул в результате их беспрестанных столкновений? Будет ли у всех молекул энергия движения одинакова или нет? Ответы на эти вопросы были получены великим английским физиком Джеймсом Клерком Максвеллом (1831–1879). Проведя теоретический анализ, он выяснил, что *энергии молекул неодинаковы*, но непрерывное хаотическое движение гигантского числа молекул газа подчиняется строгой закономерности! Максвелл смог рассчитать, какой процент молекул газа имеет ту или иную энергию, и установил, что это *распределение молекул по энергиям неизменно* (оно не изменяется с течением времени, если газ находится в неизменных условиях).

Результаты, полученные Максвеллом, представлены графически на рисунке 3.

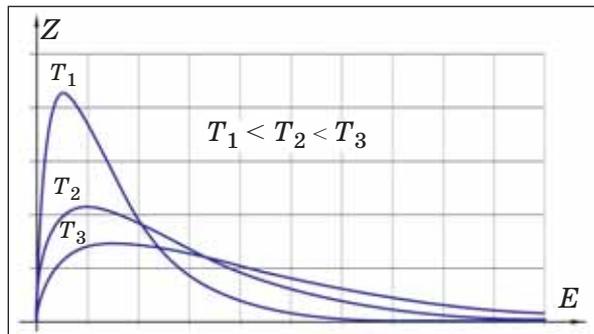


Рис. 3

На оси абсцисс отложены значения кинетической энергии E поступательного движения молекул, на оси ординат – процент молекул Z , движущихся с данной кинетической энергией.

Из графика видно, что молекулы могут иметь различное значение энергии. Однако большая часть молекул имеет энергию, значение которой близко к наиболее вероятному значению энергии (максимум графика).

Вторая особенность графика заключается в том, что положение максимума графика связано с температурой газа. Смещение максимума графика вправо, в направлении больших значений энергии, означает рост температуры газа ($T_2 > T_1$). Иными словами, пусть вы измерили температуру газа и выяснили, что температура газа возросла ($T_3 > T_2$). Это означает, что при более высокой температуре T_3 чаще (более вероятно), чем при температуре T_2 , встречаются «энергичные» молекулы. Это означает, что средняя энергия движения молекул газа стала больше ($\bar{E} = \frac{3}{2} kT$).

Во времена Максвелла открытый им для идеального газа закон (распределение молекул по энергиям) являлся совершенно новым видом физического закона. Законы такого вида называют *статистическими* (вероятностными) законами.

Пусть, к примеру, мы хотим проанализировать столкновение двух частиц. Чтобы применить динамические законы (законы Ньютона), нам необходимо знать начальные координаты и начальные скорости частиц, а также какова сила взаимодействия между частицами. Тогда мы в состоянии рассчитать ускорение, скорость, координату, импульс, кинетическую энергию частиц в любой момент времени после столкновения.

Иным образом обстоит дело с макроскопическим телом, например с идеальным газом. Для описания с помощью законов Ньютона движения всех частиц в одном моле газа нам потребовалось бы измерить $6,02 \cdot 10^{23}$ начальных координат и начальных скоростей молекул, записать и решить $6,02 \cdot 10^{23}$ уравнений! Очевидно, что подобная процедура совершенно невозможна, да и полезной физической информации она бы не принесла. Ведь нам совершенно неважно движение каждой частицы газа, её индивидуальная «судьба» – значение её скорости и энергии движения. Нас интересует обобщённый результат – какова температура газа, какое давление создаёт газ, «бомбардируя» стенки баллона, как меняется концентрация газа после того, как открыт вентиль баллона, и т. д.

Статистические закономерности в идеальном газе возникают, как это на первый взгляд ни парадоксально звучит, именно за счёт беспорядочного движения огромного числа молекул. Именно хаос порождает те закономерности, что впервые были обнаружены Максвеллом.

Давление идеального газа. Если газ находится в баллоне, то за счёт теплового движения молекул беспрестанно происходят удары молекул о стенки баллона и вследствие этого газ производит давление. По определению, давление p – величина, численно равная силе, действующей на единицу площади поверхности перпендикулярно поверхности.

$$p = \frac{F}{s}, \quad (4.3)$$

где F – сила, действующая перпендикулярно поверхности;
 s – площадь поверхности.

Единица измерения давления – паскаль (сокращённо обозначается Па).

Давление газа, обусловленное ударами молекул о стенки баллона, зависит от силы удара молекулы и числа ударов.

От чего зависит сила удара молекулы? От массы молекулы m_0 и её скорости v . (Молекулы газа движутся с различными скоростями. Следовательно, здесь под скоростью молекулы мы понимаем некоторое усреднённое значение скорости – среднюю квадратичную скорость.)

От чего зависит число ударов? От числа молекул в «пристенном» слое баллона, то есть от концентрации n . Кроме этого, число ударов зависит и от скорости молекул v . Ведь чем больше скорость, тем меньше время «путешествия» молекулы от стенки до стенки баллона, тем больше ударов способна совершить молекула в единицу времени.

Таким образом, наши рассуждения приводят к выводу, что

$$\begin{aligned} p &\sim m_0 v \cdot nv, \\ p &\sim nm_0 v^2, \\ p &\sim n\bar{E}. \end{aligned}$$

(Знак \sim это знак прямо пропорциональной зависимости.)

Проверим, что левая и правая части данного соотношения измеряются в одинаковых единицах (или, как говорят физики, имеют одинаковую размерность).

$$\begin{aligned} \text{Па} &\sim 1/\text{м}^3 \cdot \text{Дж}, \\ \text{Па} &\sim 1/\text{м}^3 \cdot \text{Н} \cdot \text{м}, \\ \text{Па} &\sim \text{Н}/\text{м}^2, \\ \text{Па} &\sim \text{Па}. \end{aligned}$$

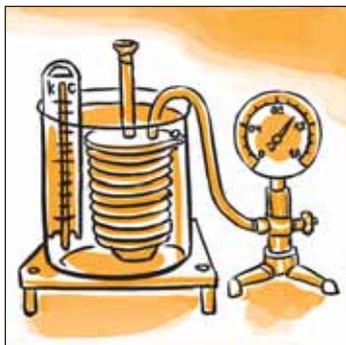
Точный расчёт на основе молекулярно-кинетической теории идеального газа приводит к следующему выводу зависимости давления от средней кинетической энергии поступательного движения молекулы:

$$p = \frac{2}{3} n\bar{E}. \quad (4.4)$$

Модель идеального газа, тепловое движение молекул, температура, абсолютный нуль температур $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$, абсолютная шкала температур, кельвин, $T = t + 273$, $\bar{E} = \frac{3}{2}kT$, постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, расчёт средней квадратичной скорости движения молекул, распределение молекул по энергиям, статистические и динамические законы, зависимость давления идеального газа от концентрации и средней кинетической энергии поступательного движения молекул, $p = \frac{2}{3}n\bar{E}$.

- 4.1 ● Определите среднюю энергию поступательного движения молекул продуктов горения, если температура пламени $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 4.2 ● Во сколько раз средняя квадратичная скорость молекул водорода больше средней квадратичной скорости молекул кислорода? Температуры газов одинаковы.
- 4.3 ● Каково давление кислорода в баллоне, если концентрация газа $2,7 \cdot 10^{25}$ $1/\text{м}^3$, а средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы кислорода составляет $6,1 \cdot 10^{-21}$ Дж?
- 4.4 ● При какой температуре средняя квадратичная скорость атомов водорода будет равна первой космической скорости $7,9$ км/с?
- 4.5 ● Солнце, как и большинство звёзд, состоит из водорода. По расчётам астрофизиков, давление в центре Солнца в 200 млрд раз больше атмосферного давления, а абсолютная температура 15 млн К. Какова концентрация ядер водорода при таких условиях в центре Солнца?

§ 5. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА



Теория, не проверяемая опытом, при всей красоте концепции теряет вес, не признаётся; практика, не опирающаяся на взвешенную теорию, оказывается в проигрыше и убытке.

*Дмитрий Иванович Менделеев (1834–1907),
русский химик, разносторонний учёный, педагог
и общественный деятель*

Вы уже знаете, как давление идеального газа зависит от средней кинетической энергии поступательного движения молекулы.

Уравнение состояния идеального газа. В молекулярно-кинетической теории идеального газа получено уравнение, определяющее зависимость давления от средней кинетической энергии поступательного движения молекулы [уравнение (4.4)]:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}.$$

Но всякий теоретический вывод требует экспериментального подтверждения. Измерить давление газа не представляет большой проблемы – существуют приборы манометры (рис. 4, а, б).



Рис. 4. Манометры различного назначения:
а – манометр для измерения давления до 1 МПа;
б – манометр для измерения давления в шине автомобиля.

Также могут быть измерены температура газа, его объём и масса газа. Эти величины, которые характеризуют тело как единое целое, без учёта его молекулярного строения, называют **макропараметрами**. Давление p , абсолютная температура T , объём V , масса m – макропараметры, характеризующие состояние газа.



5.1. Какой макропараметр определяется значением средней кинетической энергии поступательного движения молекул газа?



5.2. Какие макропараметры определяют концентрацию газа?



5.3. Каким образом может быть экспериментально подтверждена справедливость уравнения МКТ идеального газа $p = \frac{2}{3} n \bar{E}$?

В уравнении $p = \frac{2}{3} n \bar{E}$ выразим величины \bar{E} , n через макропараметры T , V , m . Тогда мы получим уравнение, содержащее только макропараметры, прямое или косвенное измерение которых является привычным делом. С помощью измерительных приборов (термометр, измерительная лента или мензурка, весы) можно осуществить экспериментальную проверку полученной зависимости. Можно убедиться

в том, приводит ли использование модели «идеальный газ» к верному результату, и в случае положительного ответа применять полученную зависимость в дальнейшем на практике.

Итак,

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}.$$

Вспомним соотношение (4.2), устанавливающее связь между средней энергией поступательного движения молекулы идеального газа \bar{E} и абсолютной температурой T :

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT,$$

где k – постоянная Больцмана.

Тогда

$$p = nkT.$$

Выразим концентрацию газа n через число молекул N и объём V , занимаемый газом [соотношение (3.4)]:

$$n = \frac{N}{V}.$$

Следовательно,

$$p = \frac{N}{V} kT,$$

отсюда

$$pV = NkT.$$

Число молекул N определим из известной нам пропорции (смотри решение задачи 1 в § 3):

$$\frac{N - m}{N_A - M},$$

где m – масса газа;

M – молярная масса газа;

N_A – постоянная Авогадро.

Тогда

$$N = \frac{m}{M} N_A.$$

Продолжая вывод, имеем

$$pV = \frac{m}{M} N_A kT.$$



5.4. Чему равно численное значение постоянной Больцмана?

Чему равно численное значение постоянной Авогадро?

Произведение постоянной Авогадро N_A и постоянной Больцмана k называют *газовой постоянной* и обозначают буквой R .

$$R = N_A \cdot k,$$

$$R = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{МОЛЬ}} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{ДЖ}}{\text{К}},$$

$$R = 8,31 \frac{\text{ДЖ}}{\text{МОЛЬ} \cdot \text{К}}.$$

(Газовую постоянную R в учебной литературе часто называют также универсальной газовой постоянной, или молярной газовой постоянной.)

Используя вновь введённое обозначение газовой постоянной, окончательно имеем

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (5.1)$$

Выведенное нами уравнение получило название **уравнения состояния идеального газа**. *Уравнение состояния – уравнение, выражающее зависимость между давлением, объёмом и абсолютной температурой для макроскопического тела определённой массы.*

Преобразуем уравнение состояния идеального газа (5.1):

$$\frac{pV}{T} = \frac{m}{M} R.$$

Если масса газа m и молярная масса M постоянны, то левая часть выражения постоянна, тогда и правая часть выражения $\frac{pV}{T}$ есть величина постоянная.

Математически это можно записать следующим образом:

$$\frac{pV}{T} = \text{const}$$

(читается: константа, от латинского *constans (constantis)* – постоянный).

Пусть в одном состоянии газа его давление, объём и температура равны соответственно p_1, V_1, T_1 , а в другом состоянии – p_2, V_2, T_2 .

Тогда

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \text{const}, \quad \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{const}.$$

И, следовательно,

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}. \quad (5.2)$$

Уравнение состояния идеального газа, записанное в виде (5.1) и (5.2), впервые фигурирует в трудах великого русского химика Дмитрия Ивановича Менделеева и известного французского физика и инженера Бенуа Поля Эмиля Клапейрона (1799–1864). По этой причине его часто называют уравнением Клапейрона – Менделеева (5.1) или уравнением Клапейрона (5.2).

Убедимся, что уравнение состояния идеального газа применимо для газов при обычных условиях, например для воздуха. Используем экспериментальную установку, которая состоит из герметического сосуда переменного объёма, манометра, термометра и ёмкости с водой различной температуры (рис. 5).

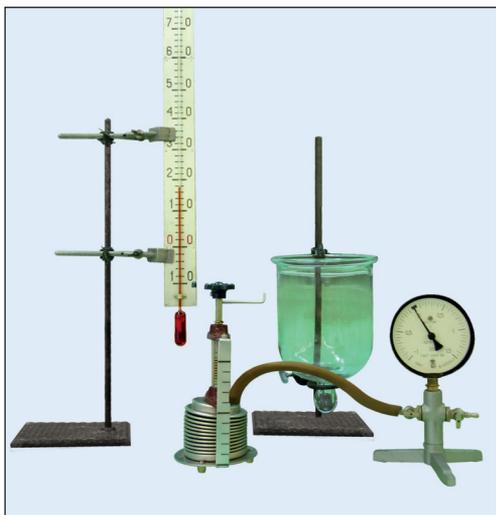


Рис. 5

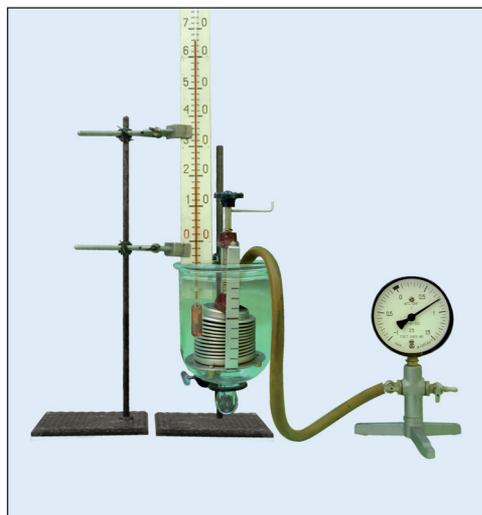


Рис. 6

Манометр позволяет измерить давление как больше, так и меньше атмосферного. На шкале прибора давление указано не в паскалях, а в специальных единицах – атмосферах (сокращённо обозначается ат, 1 ат приблизительно равна 100 кПа).

Объём герметического сосуда меняется вращением винта. Об объёме сосуда можно судить по делениям вертикальной шкалы, прикреплённой к прибору.

Для того чтобы изменить температуру воздуха в сосуде, его помещают в ёмкость с водой. Температуру измеряют термометром (рис. 6).

Измерим давление воздуха (в ат), объём воздуха (в условных единицах делений шкалы), температуру (в К). Проведём расчёт численного значения выражения $\frac{pV}{T}$.

После этого нужно изменить объём воздуха в сосуде, поместить его поочерёдно в горячую, а затем в холодную воду и вновь вычислить значение выражения $\frac{pV}{T}$.

Результаты таких измерений и расчётов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Зависимость между объёмом, давлением и температурой воздуха

Условия опыта	p , ат	V , дел.	T , К	$\frac{pV}{T}$, $\frac{\text{ат} \cdot \text{дел.}}{\text{К}}$
Комнатная температура ($t = 22 \text{ }^\circ\text{C}$)	1,0	7,5	295	0,025
Сосуд находится в горячей воде ($t = 74 \text{ }^\circ\text{C}$)	1,5	5,5	347	0,024
Сосуд находится в холодной воде ($t = 6 \text{ }^\circ\text{C}$)	0,75	9,0	279	0,024



5.5. Какой вывод о возможности применения уравнения состояния идеального газа к газам при обычных условиях может быть сделан по результатам проведённого эксперимента?

Изопроцессы. В уравнение состояния входят три макропараметра — давление, объём, абсолютная температура. Если изменяются все три параметра, то достаточно сложно проанализировать зависимость одного параметра от другого.

Ситуация упростится, если один из параметров (а также масса газа и его молярная масса) не меняется. В этом случае легко выяснить, какова зависимость между двумя переменными параметрами. *Процесс, происходящий с определённой массой газа, когда один из макропараметров неизменен, а два других макропараметра изменяются, называется изопроцессом.*

Ниже в таблице 3 указаны названия изопроцессов, соответствующих данному изопроцессу: постоянный параметр, математические соотношения между переменными параметрами, графики процессов.

Изобарный процесс. Представьте, что в горизонтально расположенном цилиндрическом сосуде с подвижным поршнем находится газ (рис. 7). Пусть поршень первоначально покоится. Это возможно, если давление газа внутри сосуда равно внешнему атмосферному давлению. Начнём постепенно нагревать газ в сосуде. Что будет происходить с газом? При увеличении температуры газа скорость движения молекул возрастёт, и они чаще и с большей силой будут ударять в поршень. Поршень сме-

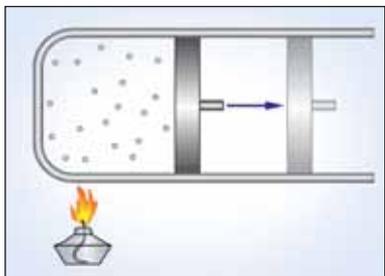


Рис. 7

стится, газ расширится, объём газа увеличится. Это приведёт к уменьшению концентрации газа, следовательно, и к уменьшению числа ударов молекул в поршень. По этой причине давление газа уменьшится, и оно вновь станет равно внешнему атмосферному давлению. Так осуществляется изобарный процесс – *изобарное расширение газа*.

В соответствии с уравнением состояния идеального газа

$$pV = \frac{m}{M} RT.$$

Очевидно, что $\frac{m}{M} R = \text{const}$. Если $p = \text{const}$ (изобарный процесс), то

$$V \sim T,$$

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}.$$

Таблица 3. Изопроцессы

Название изопроцесса, постоянный параметр	Математическое соотношение между переменными параметрами	Графики изопроцессов
Изобарный процесс $p = \text{const}$	$V \sim T$ $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$	
Изохорный процесс $V = \text{const}$	$p \sim T$ $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$	
Изотермический процесс $T = \text{const}$	$pV = \text{const}$ $p_1 V_1 = p_2 V_2$	

Если $p = \text{const}$ (изобарный процесс), то

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}.$$

Изобарное расширение газа происходит при его нагревании.



5.6. Возможно ли изобарное сжатие газа? Если да, то при каком условии? Какое молекулярно-кинетическое толкование может быть дано такому процессу?

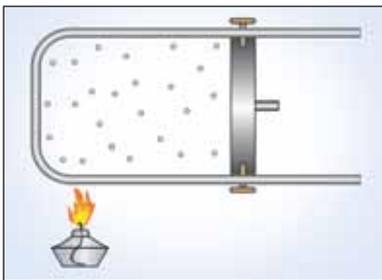


Рис. 8

Изохорный процесс. Представьте, что поршень, закрывающий сосуд, неподвижен (рис. 8). Тогда при нагревании газа в баллоне его объём не изменяется¹. Давление газа в баллоне с ростом температуры будет возрастать (почему?). Так осуществляется изохорный процесс – *изохорное нагревание газа*.

Применив уравнение состояния идеального газа, нетрудно получить математическое соотношение, связывающее давление газа и абсолютную температуру в случае изохорного процесса.

Если $V = \text{const}$ (изохорный процесс), то

Если $V = \text{const}$ (изохорный процесс), то

$$p \sim T,$$

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$$



5.7. При изохорном нагревании газа его давление увеличивается. Возможно ли при изохорном процессе уменьшение давления газа? Если да, то при каком условии? Какое молекулярно-кинетическое толкование может быть дано такому процессу?

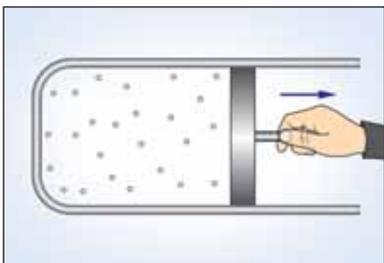


Рис. 9

Изотермический процесс. Представим, что поршень, закрывающий сосуд, вновь подвижен (рис. 9). Но в отличие от предыдущих случаев (изобарный и изохорный процессы) не будем нагревать газ, а будем постепенно смещать подвижный поршень, прикладывая внешнюю силу. Температура газа при этом поддерживается неизменной.

¹ Тепловым расширением баллона можно пренебречь.

Сместим поршень, увеличив объём, занимаемый газом. К чему это приведёт? При увеличении объёма газа концентрация газа уменьшится. Уменьшится число ударов молекул в поршень, а значит, и давление газа. Так осуществляется изотермический процесс – *изотермическое расширение газа*.

Вновь используем уравнение состояния идеального газа.

Если $T = \text{const}$ (изотермический процесс), то

$$pV = \text{const},$$

$$p_1 V_1 = p_2 V_2.$$

При изотермическом расширении газа его давление уменьшается.



5.8. Возможно ли при изотермическом процессе увеличение давления газа? Если да, то при каком условии? Какое молекулярно-кинетическое толкование может быть дано такому процессу?

Проанализируем также графики процессов:

Изобарный процесс.

$$V \sim T.$$

Графиком прямо пропорциональной зависимости объёма от абсолютной температуры в осях $V-T$ является прямая линия (график называется изобарой).

Изохорный процесс.

$$p \sim T.$$

Графиком прямо пропорциональной зависимости давления от абсолютной температуры в осях $p-T$ является прямая линия (график называется изохорой).

Изотермический процесс.

$$pV = \text{const}, p = \frac{\text{const}}{V}.$$

Графиком обратно пропорциональной зависимости давления от объёма в осях $p-V$ является гиперболола (график называется изотермой).

Примеры решения задач.

Задача 1. Исследование планеты Венера с помощью космических аппаратов позволило установить, что планета обладает плотной атмосферой, состоящей в основном из углекислого газа. Давление у поверхности в 93 раза больше атмосферного давления на Земле, температура около 475°C . (Причиной столь высокой температуры на Венере является парниковый эффект, обусловленный плотной углекислой атмосферой.) Чему равна плотность атмосферы у поверхности Венеры? Нормальное атмосферное давление $101\,325\text{ Па}$.

Решение:

Если газ, занимающий объём V , имеет массу m , то плотность газа ρ равна

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (5.3)$$

Но от массы газа (при данной температуре) зависит давление газа. Связь между давлением, объёмом и абсолютной температурой газа устанавливает уравнение состояния идеального газа

$$pV = \frac{m}{M} RT,$$

где M – молярная масса углекислого газа, она равна

$$M = 44 \frac{\text{г}}{\text{моль}}, \quad M = 44 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}};$$

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

Выразим массу газа:

$$m = \frac{pVM}{RT}.$$

Подставив данное выражение в формулу (5.3), окончательно имеем

$$\rho = \frac{pM}{RT},$$

$$\rho = \frac{9,4 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 44 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 748 \text{ К}} = 67 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Действия с единицами измерений:

$$\frac{\text{Па} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot \text{К}} = \frac{\text{Па} \cdot \text{кг}}{\text{Дж}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{Н} \cdot \text{м}} = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Ответ: $\rho = 67 \text{ кг/м}^3$.

Задача 2. Аквалангист погружается, держа в руке воздушный шарик. Чему будет равен объём шарика V_2 на глубине $h = 20 \text{ м}$ при температуре воды $t_2 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, если начальное давление в шарике p_1 практически равно атмосферному давлению, а объём шарика V_1 был равен 2500 см^3 ? Атмосферное давление считать равным 100 кПа , начальная температура воздуха в шарике $t_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Плотность морской воды 1030 кг/м^3 .

Решение:

При погружении помимо атмосферы на воздух в шаре действует столб воды, создающий давление p_{cm} , равное

$$p_{cm} = \rho gh,$$

где ρ – плотность воды;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$;

h – высота столба жидкости.

Тогда на глубине h давление воздуха в шарике p_2 будет равно

$$\begin{aligned} p_2 &= p_1 + p_{\text{ст}}, \\ p_2 &= p_1 + \rho gh. \end{aligned} \quad (5.4)$$

(Упругость оболочки шарика и создаваемое ею давление не учитываются.)

В соответствии с уравнением состояния идеального газа

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}.$$

Отсюда

$$V_2 = \frac{p_1 V_1 T_2}{p_2 T_1},$$

или с учётом (5.4) окончательно имеем

$$V_2 = \frac{p_1 V_1 T_2}{(p_1 + \rho gh) T_1}.$$

$$V_2 = \frac{10^5 \text{ Па} \cdot 283 \text{ К} \cdot 0,0025 \text{ м}^3}{(10^5 \text{ Па} + 1030 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 20 \text{ м}) \cdot 298 \text{ К}} = 0,00079 \text{ м}^3,$$

$$V_2 = 790 \text{ см}^3.$$

Ответ: $V_2 = 790 \text{ см}^3$.

Задача 3. На рисунке 10 в осях p – T изображены графики изохорных процессов – изохоры – для равных масс одного и того же газа. В каком из процессов – I или II – газ заполняет больший объём?

Решение:

Пусть в процессе I газ имеет объём V_1 , а в процессе II – объём V_2 . Проведём прямую, параллельную оси Op , которая пересечёт изохоры I и II в точках A и B соответственно. Точка A соответствует состоянию газа, при котором его параметры – давление, объём, абсолютная температура – имеют значения p_1, V_1, T' .



5.9. Чему будут равны давление, объём и абсолютная температура газа в состоянии, которое соответствует точке B?

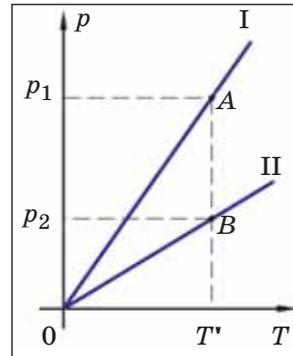


Рис. 10

Значения параметров газа в двух состояниях (точка A и точка B) связаны уравнением состояния идеального газа. Так как в процессах I и II массы газов равны, то уравнение состояния удобнее записать в виде

$$\frac{p_1 V_1}{T'} = \frac{p_2 V_2}{T'}.$$

Или

отсюда

$$p_1 V_1 = p_2 V_2,$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p_2}{p_1}.$$

Так как

то

$$\frac{p_2}{p_1} < 1,$$

$$\frac{V_1}{V_2} < 1.$$

Следовательно, объём $V_1 < V_2$.

Ответ: газ занимает больший объём в процессе II.

Задача 4. При изотермическом процессе давление p и объём V идеального газа связаны соотношением $pV = \text{const}$. Следовательно, при увеличении объёма газа в изотермическом процессе его давление уменьшается. Однако когда вы надуваете щёки, и объём, и давление возрастают! Почему?

Решение:

Обозначенное противоречие является кажущимся. Необходимо учесть, что изопроцесс – это процесс, происходящий с определённой массой газа. В рассматриваемом же случае масса газа, очевидно, увеличивается. Из уравнения состояния идеального газа

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

выразим давление

$$p = \frac{mRT}{MV}.$$

Из данного соотношения ясно, что если увеличение массы газа превосходит возрастание его объёма, то давление газа увеличится даже тогда, когда газ расширяется. Именно такая ситуация реализуется, когда надувают щёки.

Макропараметры, уравнение состояния идеального газа,

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}, \quad R = N_A \cdot k, \quad \text{газовая постоянная } R,$$

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}, \quad \text{изопроцессы (изобарный, изохорный, изотермический)}.$$

5.1 ● Резиновую присоску так удачно придавили к стеклу, что под ней совершенно не осталось воздуха. Какую силу необходимо будет приложить, чтобы оторвать присоску? Площадь поперечного сечения присоски 12 см^2 . Атмосферное давление считать равным 100 кПа .

5.2 ● Каково давление сжатого воздуха, находящегося в баллоне вместимостью 40 л при температуре $25 \text{ }^\circ\text{C}$, если масса воздуха в баллоне $0,6 \text{ кг}$? Молярная масса воздуха 29 г/моль .

5.3 ● В цилиндре дизельного двигателя автомобиля происходит сжатие воздуха, а затем под поршень впрыскивается топливо. Определите температуру в конце такта сжатия, если в начале такта температура воздуха была $45 \text{ }^\circ\text{C}$. При сжатии объём воздуха уменьшается в $16,5$ раза, а давление возрастает в 48 раз.

5.4 ● Почему давление в шинах автомобиля рекомендуют измерять перед началом движения, а не после поездки?

5.5 ● Какое количество вещества содержится в баллоне вместимостью 25 л , если при температуре 300 К газ производит давление 300 кПа ?

§ 6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИЗУЧЕНИЕ ИЗОБАРНОГО ПРОЦЕССА»



Принцип науки, почти что её определение, состоит в следующем: пробный камень всех наших знаний – это опыт.

*Ричард Фейнман (1918–1988),
выдающийся американский физик-теоретик,
лауреат Нобелевской премии*

Вам уже известно, что такое изопроцессы.

Целью данной лабораторной работы является экспериментальная проверка соотношений между макропараметрами при изобарном процессе.



6.1. Что называют изобарным процессом? Связь между какими макропараметрами следует из уравнения состояния идеального газа в случае изобарного процесса?

Оборудование: гибкая пластиковая трубка, закрытая с одной стороны и снабжённая зажимом, термометр, измерительная лента, калориметр, сосуд с горячей водой, сосуд с водой комнатной температуры, сосуд с холодной водой.

При изобарном процессе ($p = \text{const}$) объём, абсолютная температура двух состояний одной и той же массы идеального газа связаны соотношением

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}, \quad (6.1)$$

которое вытекает из уравнения состояния

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

при условии $p_1 = p_2$.



Рис. 11



Рис. 12

Если мы на опыте убедимся в соотношении (6.1), например, для воздуха, то тем самым будет подтверждено, что модель идеального газа применима для описания свойств газов.

Пусть трубка длиной l_1 помещена в горячую воду так, чтобы открытый конец трубки сообщался с атмосферой (рис. 11). При этом давление воздуха в трубке p_1 будет равно атмосферному давлению p_A :

$$p_1 = p_A.$$

Объём воздуха в трубке V_1 будет равен

$$V_1 = l_1 s_1, \quad (6.2)$$

где l_1 – длина трубки;

s_1 – площадь поперечного сечения трубки.

Температура воздуха в трубке будет равна температуре воды T_1 .

После того как воздух в трубке прогреется до температуры воды, перекроем с помощью зажима открытый конец трубки, достанем трубку из горячей воды и поместим конец трубки с зажимом в сосуд с водой, имеющей комнатную температуру (рис. 12).

Откроем зажим, по мере охлаждения воздуха вода будет поступать в трубку.

Чтобы давление воздуха в трубке было вновь равно атмосферному давлению, сместим трубку так, чтобы уровень воды в трубке совпадал с уровнем воды в сосуде.

1.3. Вычислите относительную погрешность ε косвенного измерения C_1 и C_2 по формулам

$$\varepsilon_{C_1} = \frac{\Delta l}{l_1} + \frac{\Delta T}{T_1},$$

$$\varepsilon_{C_2} = \frac{\Delta l}{l_2} + \frac{\Delta T}{T_2}.$$

Абсолютную погрешность прямого измерения длины Δl примите равной 1 см.

$$\Delta l = 1 \text{ см.}$$

Абсолютную погрешность прямого измерения температуры примите равной 1 °С.

Тогда

$$\Delta T = 1 \text{ К.}$$

1.4. Вычислите абсолютную погрешность ΔC косвенного измерения C_1 и C_2 по формуле

$$\varepsilon_{C_1} = \frac{\Delta C_1}{C_1}, \text{ отсюда } \Delta C_1 = \varepsilon_{C_1} \cdot C_1,$$

$$\varepsilon_{C_2} = \frac{\Delta C_2}{C_2}, \text{ отсюда } \Delta C_2 = \varepsilon_{C_2} \cdot C_2.$$

1.5. Сравните значения C_1 и C_2 с учётом абсолютной погрешности измерений. Сделайте вывод, применимы ли для воздуха математические соотношения между объёмом и абсолютной температурой для изобарного процесса, полученные теоретически на основе модели идеального газа.



Задание 2.

Поместите трубку, открытый конец которой закрыт «водяной пробкой», во внутренний стакан калориметра, наполненного холодной водой. Измерьте длину воздушного столба l_3 и температуру воздуха t_3 для нового (третьего) состояния газа.

Проведите расчёты C_3 , ε_{C_3} , ΔC_3 .

Сделайте вывод.

Изобарный процесс, расчёт относительной и абсолютной погрешности косвенного измерения.

6.1 ● В экспериментальной установке из резервуара ёмкостью 250 см³ был тщательно выкачан воздух до глубокого вакуума, а затем резервуар заполнили гелием. Масса гелия 0,02 г. При какой температуре находится гелий в резервуаре, если он производит давление 20 кПа?

6.2 ● В баллоне вместимостью 25 л находится кислород при температуре 27 °С. Вследствие утечки газа давление снизилось на 50 кПа. На сколько уменьшилась масса газа в баллоне? Сколько молекул вышло из баллона? Температуру газа считать неизменной.

6.3 ● Медицинские банки – стеклянные баллоны с округлым дном и утолщёнными краями ёмкостью 30–70 см³. Считается, что благодаря применению банок усиливается кровообращение в коже, повышается тонус и эластичность мышц. Когда банки ставят на спину, то на кожу наносится тонкий слой крема, делается фитиль из ваты, который крепится на металлическом пинцете. Фитиль смачивается спиртом, поджигается и помещается в банку на 0,5–1 с. Затем банка прикладывается к коже, и кожа втягивается в банку, приобретая багровую окраску. Объясните, почему кожа втягивается в банку.

6.4 ● Пневмопочта представляет собой герметическую трубу, по которой под действием избыточного давления движется закрытый контейнер – капсула с документами или грузом. На сколько необходимо при помощи компрессора повысить давление воздуха в пневмопочте, чтобы капсула, движущаяся равномерно, начала увеличивать скорость с ускорением 0,5 м/с²? Диаметр капсулы 90 мм, её масса вместе с грузом 2 кг.

6.5 ● На рисунке 13 изображены изотермы I и II для одного моля азота – графики зависимости давления от объёма в случае изотермического процесса. Какой из изотермических процессов – I или II – протекает при более высокой температуре? Во сколько раз температура выше? Чему равны температуры в этих процессах?

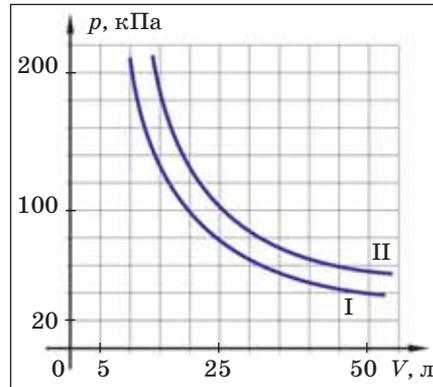


Рис. 13

§ 7. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ. ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА. КИПЕНИЕ



Само наличие в природе жидкостей и твёрдых тел обязано существованию межмолекулярного взаимодействия... свидетельства о наличии электрических зарядов в атомах и молекулах позволили предположить, что межмолекулярные взаимодействия имеют электрическую природу.

*Из книги «Введение в теорию межмолекулярных взаимодействий»
(автор И. Г. Каплан)*

Вы уже изучали процессы конденсации, испарения, кипения.

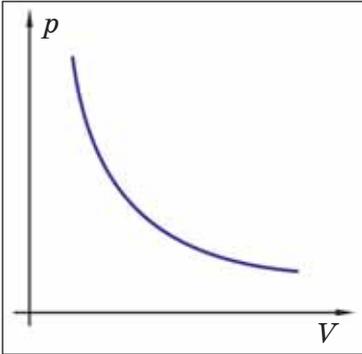


Рис. 14

Если $T = \text{const}$ (изотермический процесс), то

$$p \sim \frac{1}{V}.$$

Эта зависимость выполняется только при не очень высоких давлениях, а при давлениях в десятки мегапаскалей (сотни атмосфер) наблюдаются существенные отклонения от результатов теории идеального газа.

При рассмотрении модели идеального газа (§ 4) мы выяснили, что при нормальных условиях среднее расстояние между молекулами газа в десятки раз больше размера молекул. Представьте, что газ изотермически сжали, его давление увеличилось в тысячу раз и составило 1000 ат. Тогда и объём газа уменьшится в 1000 раз. Объём, приходящийся на каждую молекулу, уменьшится в 1000 раз, а расстояние между молекулами в $\sqrt[3]{1000} = 10$ раз. В этом случае молекулы, находясь ближе друг к другу, взаимодействуют между собой. Их энергия взаимодействия (потенциальная энергия) может превысить среднюю кинетическую энергию. Это означает, что отдельные молекулы имеют возможность объединиться в «коллектив», то есть образуется жидкость.

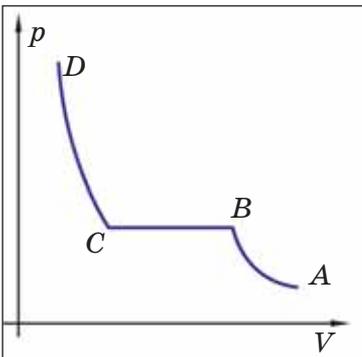


Рис. 15

Реальные газы. Графиком зависимости давления от объёма в случае изотермического процесса является гипербола – график обратно пропорциональной зависимости, называемый в этом случае *изотермой* (рис. 14).

Действительно, в соответствии с уравнением состояния идеального газа

$$pV = \frac{m}{M} RT.$$

Отсюда следует, что

$$p = \frac{mRT}{M} \cdot \frac{1}{V}.$$

Процесс перехода газа в жидкость называется конденсацией. Благодаря конденсации изотерма реального газа выглядит так, как это показано на рисунке 15. Участок изотермы AB – участок, на котором происходит сжатие газа. При значительном сжатии газа молекулы

сближаются так, что начинается конденсация (точка B изотермы). Участок изотермы BC соответствует ситуации, когда одновременно существуют и газ, и жидкость. Причём чем больше сжимается вещество, тем большая его часть переходит в жидкое состояние. На участке изотермы BC по этой причине давление неизменно. После того как вещество полностью переводят в жидкое состояние (точка C изотермы), в дальнейшем осуществляется сжатие жидкости (участок изотермы CD).



7.1. Почему на участке изотермы CD , в отличие от участка AB , для незначительного уменьшения объёма вещества требуется большое увеличение давления?

Одним из условий перехода газа в жидкость является сжатие газа. Но это не единственное необходимое условие!



7.2. Как связаны между собой средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул и абсолютная температура?

Если температура газа будет велика, то даже при самом значительном уменьшении объёма газа энергия взаимодействия молекул не превысит среднюю кинетическую энергию теплового движения молекул ($\bar{E} = \frac{3}{2}kT$). Для того чтобы процесс конденсации газа мог быть возможен, температура газа должна быть ниже некоторой так называемой критической температуры. *Критическая температура – это температура, выше которой невозможен процесс перехода вещества из газообразного в жидкое состояние ни при каких давлениях.*



7.3. Какова особенность строения воды? (Подсказка. Вспомните, каким физическим процессом сопровождается растворение солей, кислот, щелочей в воде.)

Из-за сильного взаимодействия молекул воды – заряженных «гантелек» – водяной пар превращается в жидкость вплоть до температуры $374\text{ }^{\circ}\text{C}$. В то же время критическая температура углекислого газа составляет $31\text{ }^{\circ}\text{C}$, перевод азота в жидкое состояние требует его охлаждения ниже температуры $-147\text{ }^{\circ}\text{C}$, а критическая температура гелия $-268\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Испарение. Насыщенный пар. Энергия движения у молекул неодинакова. Поэтому, например, среди молекул жидкости всегда имеются группы молекул, чья энергия в какой-то момент времени больше средней кинетической энергии теплового движения. Преодолев силы межмолекулярного взаимодействия со стороны ближайших «соседей»-молекул, такая группа молекул может покинуть жидкость – происходит испарение. **Испарение – переход вещества из жидкого состояния в газообразное состояние.**

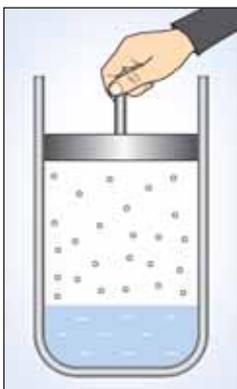


Рис. 16

Нальём некоторое количество жидкости в цилиндрический баллон так, чтобы жидкость занимала часть его объёма, и закроем баллон герметично крышкой-поршнем (рис. 16).

Над свободной поверхностью жидкости за счёт испарения будет образовываться газ (пар)¹. С течением времени концентрация пара увеличивается, и всё больше и больше молекул, совершая беспорядочное тепловое движение, возвращаются, влетают обратно в жидкость – происходит конденсация. В итоге возникает динамическое (подвижное) равновесие – равенство процессов испарения и конденсации: число молекул, ежесекундно покидающих жидкость, равно числу молекул, возвращающихся в жидкость. **Пар, находящийся в равновесии со своей жидкостью, называют насыщенным паром.**

Может ли пар быть *ненасыщенным*? Да. Резко увеличим свободный объём баллона, подняв поршень вверх, – пар станет ненасыщенным. Если жидкости в баллоне достаточное количество, то через некоторое время пар вновь будет насыщенным. Если же жидкости будет так мало, что она испарится полностью, то пар так и останется ненасыщенным.

Может ли пар быть *перенасыщенным*? Да, но такое состояние пара неустойчиво. Резко уменьшим объём баллона, сдвинув поршень вниз. При этом концентрация пара увеличится, следовательно, больше молекул ежесекундно движется в сторону жидкости. Конденсация начнёт преобладать над испарением, и так до тех пор, пока концентрация пара не станет прежней, пока пар не станет вновь насыщенным.



7.4. Как зависит давление газа от его концентрации и абсолютной температуры?

Изменение объёма насыщенного пара не приводит к изменению его концентрации. При расширении пара «недостача» пара восполняется за счёт «дополнительного» испарения жидкости. При сжатии «избыток» пара конденсируется, превращается в жидкость. **Давление насыщенного пара при постоянной температуре не зависит от его объёма.**

¹ Принципиальной разницы между понятиями «газ» и «пар» нет. Как правило, термин «пар» применяется тогда, когда речь идёт о состоянии вещества в обычных природных условиях (водяной пар, пары спирта, эфира).



7.5. Каким – ненасыщенным, насыщенным, перенасыщенным – является пар (газ) в состоянии, изображённом участком ВС изотермы реального газа (рис. 15)?

Давление насыщенного пара зависит только от его температуры.

На рисунке 17 в качестве примера показан график зависимости давления углекислого газа от температуры для того диапазона температур, когда он сосуществует совместно с жидкостью.



7.6. Огнетушители CO_2 (углекислотные) заполнены двуокисью углерода, которая находится в баллоне огнетушителя под давлением 5,7 МПа. Из каких физических соображений выбрано такое давление? Почему в соответствии с «Указаниями по эксплуатации и безопасности углекислотного огнетушителя» не допускается «хранение огнетушителей... под прямыми солнечными лучами»?

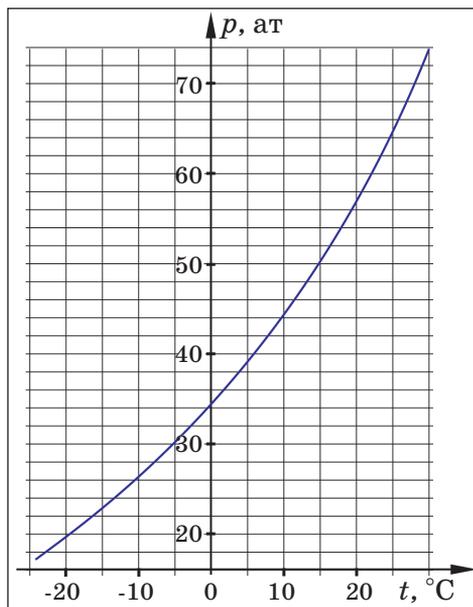


Рис. 17

В таблице 4 приведены значения давления насыщенного водяного пара в зависимости от температуры.

Таблица 4. Зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры

Температура, °C	0	10	20	30	40	50
Давление, кПа	0,61	1,23	2,33	4,24	7,33	12,3
Температура, °C	60	70	80	90	100	105
Давление, кПа	19,9	31,0	47,3	70,1	101	120

Как видно из таблицы, давление насыщенного водяного пара тем больше, чем выше температура. Например, при возрастании температуры от 50 °C (323 К) до 100 °C (373 К) давление увеличивается в 8 раз. Давление идеального газа в этих условиях увеличилось бы в $373/323 = 1,15$ раза. Такое разительное отличие в поведении насыщенного водяного пара и идеального газа объясняется тем, что с ростом температуры возрастает концентрация водяного пара.

Влажность воздуха. В природе постоянно происходит круговорот воды. Испарившаяся с поверхности водоёмов – океанов, морей, озёр, рек – вода поступает в атмосферу. Но благодаря конденсации и последующим осадкам в виде дождя и снега она вновь поступает в водоёмы. В результате водяной пар, содержащийся в воздухе, как правило, не является насыщенным. Воздух в Сахаре суше, чем в тропиках, и в тех же тропиках в ясный погожий день водяного пара в воздухе меньше, чем во время проливного дождя.

Для того чтобы характеризовать содержание водяного пара в воздухе, введена физическая величина – *относительная влажность*. **Относительной влажностью называют отношение давления водяного пара, содержащегося в воздухе, к давлению насыщенного водяного пара при той же температуре, выраженное в процентах.**

Обозначается относительная влажность буквой φ (читается: фи).

$$\varphi = \frac{p}{p_{\text{нас}}} \cdot 100 \%,$$

где p – давление водяного пара, содержащегося в воздухе;

$p_{\text{нас}}$ – давление насыщенного водяного пара при той же температуре.

Чем больше относительная влажность, тем ближе водяной пар в воздухе к насыщению. При относительной влажности 100 % пар будет насыщенным.

Человек наиболее комфортно чувствует себя при относительной влажности 40–60 %. При меньшей влажности с поверхности кожи человека происходит интенсивное испарение, и он будет испытывать чувство жажды; при большей влажности малое испарение с поверхности кожи ухудшает терморегуляцию организма. Важное значение имеет контроль влажности в музеях, библиотеках, на производстве.

Для измерения относительной влажности, как правило, используют прибор психрометр¹ (рис. 18). Прибор состоит из двух – сухого и увлажнённого – термометров, также имеется психрометрическая таблица (таблица 5).

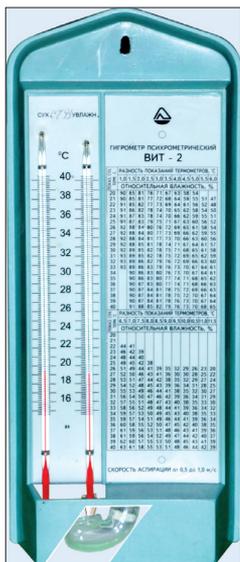


Рис. 18



7.7. Каков принцип действия психрометра?



7.8. В каком случае показания сухого и увлажнённого термометров совпадают? Чему в этом случае равна относительная влажность?

¹ От греческого *psychria* – холод + ... метр.

Таблица 5. Психрометрическая таблица

Показания сухого термометра, °С	Разность показаний сухого и влажного термометров, °С										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Относительная влажность, %										
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5	—
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	—
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12
16	100	90	81	71	62	54	46	37	30	22	15
17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34
27	100	92	85	78	71	65	59	52	47	41	36
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37

Практическая работа «Измерение относительной влажности воздуха».

Оборудование: лабораторный термометр, стакан с водой комнатной температуры, небольшой кусочек марли, психрометрическая таблица.

Указания к работе:



Задание 1. Определение относительной влажности воздуха.

1. Измерьте температуру воздуха в учебном кабинете.
2. Изготовьте психрометр. Определите показания увлажнённого термометра.

3. Используя психрометрическую таблицу, определите относительную влажность воздуха в кабинете. Сравните определённое вами значение относительной влажности со значениями, наиболее благоприятными для человека.



Задание 2. Определение давления водяного пара в учебном кабинете.

1. Воспользуйтесь таблицей 4 и запишите, чему равно значение давления насыщенного водяного пара в учебном кабинете в момент проведения практической работы.
2. Используя формулу, определяющую относительную влажность φ , рассчитайте давление водяного пара в учебном кабинете в момент проведения практической работы.



Задание 3. Определите массу водяного пара в учебном кабинете (для этого вам понадобится определить объём кабинета). Сравните полученное значение с массой воздуха в кабинете.

Кипение. Ещё один способ перевести вещество из жидкого состояния в газообразное – это кипение. Напомним основные особенности этого явления. Как и испарение, кипение – образование пара. Но если испарение – это «плоскостной» процесс, испарение происходит со свободной поверхности жидкости, то кипение – «объёмный» процесс – образование, рост и всплытие пузырьков пара, происходящее по всему объёму жидкости. Если испарение происходит при любой температуре, то кипение – только при достижении жидкостью температуры кипения. Почему? В воде на дне и стенках сосуда всегда имеются микроскопические пузырьки воздуха, растворённого в воде. Эти пузырьки наполнены насыщенным паром. Чтобы пузырьки стали заметны и «заявили о себе», насыщенному пару необходимо «расширить владения». Для этого насыщенному пару нужно преодолеть внешнее давление – атмосферное давление плюс давление столба жидкости.



7.9. От чего зависит выталкивающая сила, действующая на тело, погружённое в жидкость?

Как только пузырёк пара начинает расширяться, возрастает выталкивающая (архимедова) сила. На тело, находящееся в жидкости определённой плотности, действует выталкивающая сила, которая, как известно, тем больше, чем больше объём погружённого тела. В итоге пузырёк пара при увеличении объёма отрывается от дна и стенок сосуда, всплывает, достигает поверхности жидкости, и насыщенный пар выбрасывается в воздух.

Нормальное атмосферное давление составляет 101 кПа. У насыщенного водяного пара такое давление достигается при температуре

100 °С (смотрите таблицу 4). Поэтому при нормальном атмосферном давлении вода кипит именно при 100 °С. Давление насыщенного пара других жидкостей достигает значения 101 кПа при другой температуре, к примеру, спирт кипит при температуре 78 °С, а глицерин – только при температуре 240 °С.

Что будет, если внешнее давление больше нормального атмосферного давления? Тогда жидкость начнёт кипеть только при более высокой температуре. Например, вода в кастрюле-скороварке с герметичной крышкой, под которой создаётся избыточное давление, закипает при температуре 120 °С.

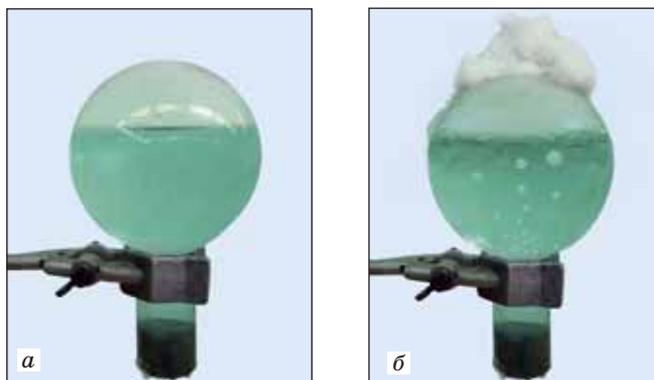


Рис. 19

Что будет, если внешнее давление меньше нормального атмосферного давления? В этом случае процесс кипения начнётся при более низкой температуре, как это, например, происходит высоко в горах. Пример такого «холодного» кипения можно наблюдать в следующем опыте. В колбу наливают воду и нагревают её до кипения. Затем, продолжая нагревать, быстро закрывают колбу резиновой пробкой, убирают нагреватель и переворачивают колбу горлом вниз (рис. 19, а). Вода в колбе не кипит. Почему? Кипению препятствуют насыщенные водяные пары, находящиеся над поверхностью жидкости. Охладим колбу, положив сверху снег. При этом вода бурно кипит (рис. 19, б)! Почему именно охлаждение колбы, а не нагревание приводит к кипению? Вспомните, что мы закрыли колбу пробкой тогда, когда вода кипела, то есть свободный объём колбы был заполнен практически полностью не воздухом, а насыщенным паром. Когда же мы охлаждаем колбу, охлаждаем и насыщенный пар, её заполняющий. При этом его давление уменьшается, а значит, ничто не препятствует расширению пузырьков пара, находящихся в воде, то есть «холодному» кипению воды.

Изотерма реального газа, **конденсация**, критическая температура, **испарение**, **насыщенный пар**, **независимость давления насыщенного пара от объёма**, **зависимость давления насыщенного пара от температуры**, **относительная влажность воздуха**, $\varphi = \frac{p}{p_{нас}} \cdot 100\%$, **психрометр**, **кипение**, **зависимость температуры кипения от величины внешнего давления**.

7.1 ● Проблемой перевода газов в жидкое состояние путём их сжатия в XIX веке занимался знаменитый английский физик Майкл Фарадей. Однако ни ему, ни другим учёным, которые к середине XIX века довели давление до 3000 ат с понижением температуры до $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, не удалось превратить в жидкость такие газы, как, например, кислород или водород. В чём причина тогдашних научных неудач? Критические температуры кислорода и водорода соответственно равны 154 и 33 К.

7.2 ● Сухой термометр психрометра показывает значение температуры $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, увлажнённый – $16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Чему равна относительная влажность в помещении, где находится психрометр? Чему равно давление водяного пара, находящегося в воздухе?

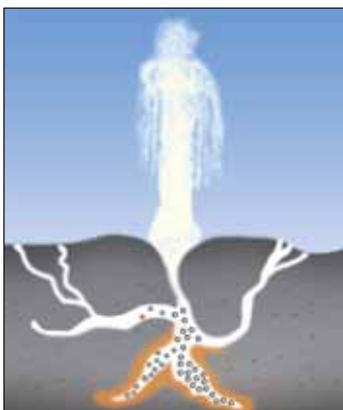


Рис. 20



7.3 Гейзеры – это источники, периодически выбрасывающие фонтаны горячей воды и пара до высоты 20–40 м и более. Гейзеры располагаются вблизи действующих или сравнительно недавно уснувших вулканов, от которых поступает тепловая энергия, необходимая для нагрева подземных вод, заполняющих гейзер. Гейзер представляет собой подземный резервуар, расположенный на глубине в несколько десятков метров, и узкий вертикальный канал, наполненный водой и выходящий в бассейн на поверхности земли (рис. 20). Подготовьте сообщение по теме «Физика гейзера». Предложите способ изготовления модели гейзера.

7.4 ● Чему равна плотность насыщенного водяного пара при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$?

7.5 ● В герметичный баллон 40 л, заполненный осушенным воздухом при температуре $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, ввели

0,5 г воды. Вычислите, чему стала равна относительная влажность воздуха в баллоне. Какое количество воды (по массе) необходимо ввести в баллон до полного насыщения водяного пара?

§ 8. ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ



Вода... Самое распространённое в природе химическое соединение.

Химический энциклопедический словарь

Вы уже знаете, что молекулы жидкости взаимодействуют между собой, благодаря чему жидкость сохраняет свой объём.

Поверхностное натяжение. Приходилось ли вам на стеблях травы наблюдать не капельки, а кубики росы? Удавалось ли вам выдувать мыльные пузыри в форме пирамидок? Если тонкую медную проволоку поместить в пламя газовой горелки, почему на конце расплавленной проволоки образуется маленький шарик? Почему небольшие порции жидкости стремятся принять исключительно шарообразную форму? Вот каким образом, к примеру, в промышленных масштабах изготавливают охотничью дробь так называемым башенным методом. Расплавленный металл выливают в медный «дуршлаг» с отверстиями от 0,07 до 0,5 мм, закреплённый на высоте 30–45 м. В полёте капли расплавленного металла принимают форму шара, успевают охладиться, и образовавшиеся твёрдые металлические шарики-дробинки падают в резервуар с водой. Оказывается, если жидкость не «расплющена» силой тяжести, то она принимает форму, при которой площадь её поверхности будет минимальной, – форму шара. Если сравнить различные геометрические тела равного объёма, то именно шар обладает наименьшей поверхностью. К примеру, площадь поверхности шара на 20 % меньше площади поверхности куба того же объёма.



Рис. 21



Рис. 22

Чем же обусловлено «стремление» жидкости минимизировать свою поверхность? Дело оказывается в том, что *поверхностный слой жидкости* отличается от её внутренних слоёв. Внутри жидкости каждая молекула окружена молекулами-«соседями». В итоге в среднем силы притяжения этих молекул-«соседей» уравнивают друг друга (рис. 21).

Иное дело – молекулы на поверхности жидкости (рис. 22). Со стороны внутренних слоёв жидкости на молекулу действуют силы притяжения, а с внешней стороны такие силы практически не действуют (концентрация молекул пара существенно меньше концентрации молекул жидкости). Под действием сил притяжения часть молекул поверхностного слоя втягивается внутрь жидкости – поверхность жидкости уменьшается.



Рис. 23

Нечто подобное наблюдается, когда часть пчёл покидает улей: вылетевшие пчёлы плотно группируются, собираясь в каплеобразный пчелиный рой (рис. 23).

Конечно, не все молекулы могут уйти с поверхности внутрь жидкости. Этому препятствуют силы межмолекулярного отталкивания, возникающие при уменьшении расстояния между молекулами.

Для того чтобы выдуть, например, мыльный пузырь, необходимо совершить определённую механическую работу. Почему? Это связано с тем, что необходимо увеличить площадь поверхности жидкости, то есть вытянуть молекулы на поверхность, преодолевая силы притяжения со стороны молекул, находящихся во внутренних слоях жидкости. Увеличение площади поверхностного слоя требует «подъёма» молекул из «глубин жидкости», а значит, молекулы поверхностного слоя обладают большей потенциальной энергией, чем молекулы внутри жидкости.

Избыток энергии поверхностного слоя, обусловленный различием межмолекулярного взаимодействия внутри жидкости и на границе «жидкость – газ», называют *поверхностной энергией*. Чем больше площадь поверхностного слоя, тем больше молекул обладают избытком энергии, тем больше поверхностная энергия. Иными словами, поверхностная энергия E прямо пропорциональна площади поверхностного слоя жидкости s :

$$E \sim s,$$

или

$$E = \sigma s, \quad (8.1)$$

где σ (читается: сигма) – коэффициент пропорциональности, называемый поверхностным натяжением. Поверхностное натяжение измеряется в Дж/м² или Н/м. (Напомним, что Дж = Н·м.)

Поверхностное натяжение зависит от рода жидкости и её температуры. Повышение температуры означает увеличение энергии беспорядочного теплового движения, а значит, уменьшение величины избыточной энергии, необходимой для перехода молекулы в поверхностный слой. По этой причине с ростом температуры поверхностное натяжение уменьшается.

В таблице 6 указаны значения поверхностного натяжения для некоторых жидкостей при температуре 20 °С.

Таблица 6. Поверхностное натяжение жидкостей, мН/м

Вода	73	Ртуть	510
Глицерин	63	Спирт	22
Мыльный раствор	25–40	Керосин	24

Если прекратить выдувать мыльный пузырь, то он сжимается и площадь поверхности пузыря уменьшается. Следовательно, вдоль поверхности жидкости действуют межмолекулярные силы, стремящиеся сократить площадь поверхностного слоя. Если на воду аккуратно положить иголку, то она не утонет, а останется на поверхности воды (рис. 24, а). Внимательно разглядывая поверхность воды, мы увидим, что иголка находится в углублении. Следовательно, площадь поверхностного слоя увеличилась, и вновь действуют межмолекулярные силы, стремящиеся сократить площадь поверхностного слоя. Эти силы называют *силами поверхностного натяжения* (рис. 24, б). Именно эти силы способны удерживать насекомых на поверхности воды.

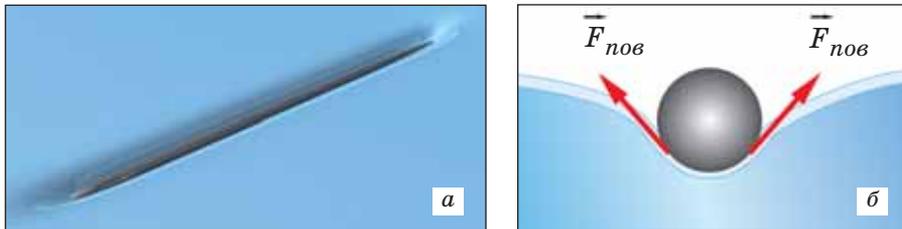


Рис. 24



Рис. 25. Водомерка

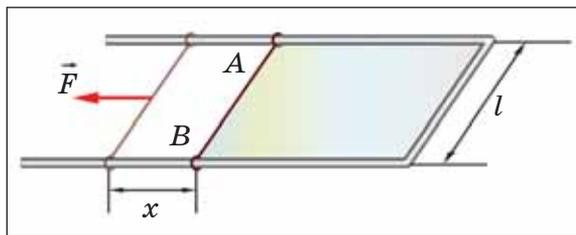


Рис. 26

Выведем формулу для расчёта силы поверхностного натяжения. Пусть на прямоугольной рамке с перемычкой AB длиной l создана мыльная плёнка (рис. 26). Приложив силу F , равномерно переместим перемычку на расстояние x , увеличив при этом площадь поверхности плёнки.



8.1. Как вычисляется механическая работа, совершаемая постоянной силой?

Механическая работа A , совершаемая постоянной силой F , равна

$$A = Fx.$$

На перемычку со стороны мыльной плёнки действуют две силы поверхностного натяжения $F_{нов}$ (ведь у мыльной плёнки два поверхностных слоя). Так как перемычка перемещалась равномерно, то внешняя сила F и силы поверхностного натяжения $2F_{нов}$ уравновешивали друг друга:

$$F = 2F_{нов}.$$

Тогда

$$A = 2F_{нов}x. \quad (8.2)$$

За счёт механической работы поверхностная энергия увеличилась на ΔE .

$$A = \Delta E. \quad (8.3)$$

С учётом выражения (8.1) имеем

$$\Delta E = \sigma \Delta s, \quad (8.4)$$

где Δs – увеличение площади поверхностного слоя.

$$\Delta s = 2l\Delta x. \quad (8.5)$$



8.2. Объясните, почему в последнем выражении присутствует множитель 2?

Выражения (8.2) – (8.5) позволяют получить итоговый результат:

$$F_{нов} = \sigma l. \quad (8.6)$$

Как следует из полученного выражения, сила поверхностного натяжения зависит от поверхностного натяжения и длины границы поверхностного слоя.

Лабораторная работа «Определение поверхностного натяжения».

Оборудование: весы с разновесами, песок, чашка с водой или мыльным раствором, проволока на нити, измерительная линейка.

Указания к работе:



Задание 1.

1. Измерьте линейкой длину проволоки d (рис. 27).
2. Привяжите к одной из чашек весов нить с подвешенной проволочкой, добейтесь горизонтального положения проволочки. На другую чашку весов положите лист бумаги и уравновесьте весы песком.

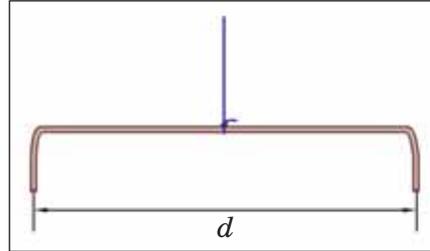


Рис. 27

3. Под чашкой весов с проволочкой расположите чашку с водой так, чтобы поверхность воды находилась от проволочки на расстоянии 1–2 см. Медленно опустите проволочку так, чтобы она коснулась воды и удерживалась бы в таком положении силами поверхностного натяжения.

4. Осторожно постепенно добавляйте песок до отрыва проволочки от поверхности воды.

5. Осушите проволочку фильтровальной бумагой и уравновесьте весы, кладя гири и разновесы на чашку весов с проволочкой.



8.3. Как рассчитывается сила тяжести?

6. Вычислите поверхностное натяжение σ , используя формулу

$$\sigma = \frac{mg}{2d},$$

где m – масса гирь, потребовавшихся для уравновешивания весов.



8.4. Как обосновать множитель 2 в формуле для расчёта поверхностного натяжения σ ?



Задание 2. Проведите расчёт погрешности измерений, сравните полученное значение поверхностного натяжения с табличным значением.

Явление смачивания и несмачивания. Если капля жидкости находится на поверхности твёрдого тела (рис. 28, *a*, *б*), то одновременно взаимодействуют между собой молекулы и газа, и жидкости, и твёрдого тела. Наиболее существенны при этом межмолекулярные силы взаимодействия между частицами самой жидкости и частицами жидкости и твёрдого тела. Результат такого взаимодействия может быть различным.

Если взаимодействие «твёрдое тело – жидкость» больше взаимодействия «жидкость – жидкость», то капля жидкости растекается по

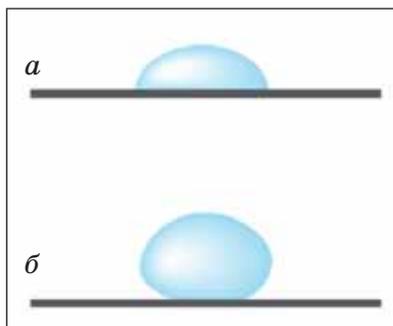


Рис. 28

поверхности твёрдого тела (рис. 28, *а*). Так происходит, например, с каплей воды, помещённой на чистую стеклянную пластинку, или с каплей расплавленного олова, попавшей на поверхность меди. Если жидкость растекается по поверхности твёрдого тела, то такое явление называют *смачиванием*.

В противном случае, если взаимодействие «твёрдое тело – жидкость» меньше взаимодействия «жидкость – жидкость», то капля жидкости сохраняет шарообразную форму, будучи «приплюснутой» силой тяжести (рис. 28, *б*). Так происходит, если капля воды находится на поверхности парафина или промасленной бумаги либо капля расплавленного олова находится на поверхности алюминия. В этом случае говорят, что капля *не смачивает* твёрдое тело.

Явление смачивания и несмачивания имеет важное значение в промышленности и быту. Окрашивание изделий, нанесение лакокрасочных покрытий, стирка, склеивание изделий – примеры процессов, где необходимо хорошее смачивание. Гидроизоляционные материалы, которые используют для изготовления зонтика, палатки или дождевого плаща, наоборот, имеют малую смачиваемость.

Для того чтобы вода лучше смачивала поверхность, например ткани, необходимо уменьшить её поверхностное натяжение. Для этой цели используют мыло, различные стиральные порошки, в состав которых входят так называемые поверхностно-активные вещества. Молекулы поверхностно-активных веществ ввиду особенностей их строения уменьшают поверхностное натяжение воды, а это ведёт к увеличению её проникающей и смачивающей способностей. В итоге

мыльная вода обволакивает и увлажняет частицы грязи, очищает ткани и другие материалы существенно лучше, чем чистая вода.

Капиллярные явления. Межмолекулярное взаимодействие «твёрдое тело – жидкость» приводит к искривлению поверхности жидкости у стенки сосуда (рис. 29, *а*, *б*). При смачивании жидкостью стенок сосуда сила поверхностного натяжения приподнимает

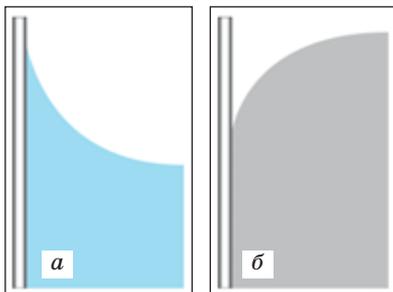


Рис. 29

край жидкости до тех пор, пока не будет уравновешена силой тяжести, действующей на поднятую жидкость (рис. 29, а). В случае если жидкость не смачивает твёрдое тело, происходит опускание края жидкости (рис. 29, б).

Особенно заметно явление подъёма смачивающей жидкости в узких трубках – *капиллярах*¹. Чем меньше диаметр трубки-капилляра, тем на большую высоту поднята смачивающая жидкость (рис. 30, а). Высота подъёма зависит также и от свойств жидкости – её поверхностного натяжения и плотности.



8.5. Изменится ли высота подъёма жидкости в капилляре при увеличении её температуры?

Несмачивающая жидкость будет, наоборот, опускаться в капилляре на некоторую глубину по сравнению с уровнем жидкости в широком сосуде (рис. 30, б). Так, например, ведёт себя ртуть в стеклянной трубке.

Явление капиллярности широко распространено в природе, используется в быту и технике. Многочисленные капилляры пронизывают растительные и животные ткани. Салфетки, полотенца, губки позволяют быстро промокнуть воду благодаря мелким порам – капиллярам. Множество капилляров пронизывают почву. По этим капиллярам вода поднимается до поверхности и там испаряется. Чтобы избежать пересыхания почвы, поверхностный слой капилляров в почве стараются разрушить, проводя боронование. Кирпичи, имеющие мелкие поры, хорошо впитывают влагу. Чтобы вода от фундамента здания не поступала к кирпичам и не происходило намокание стен, между фундаментом и кирпичной кладкой прокладывают слой гидроизоляционных материалов.

Явление поверхностного натяжения, поверхностная энергия, $E = \sigma s$, поверхностное натяжение, $F_{\text{нов}} = \sigma l$, **явление смачивания и несмачивания, капиллярные явления.**

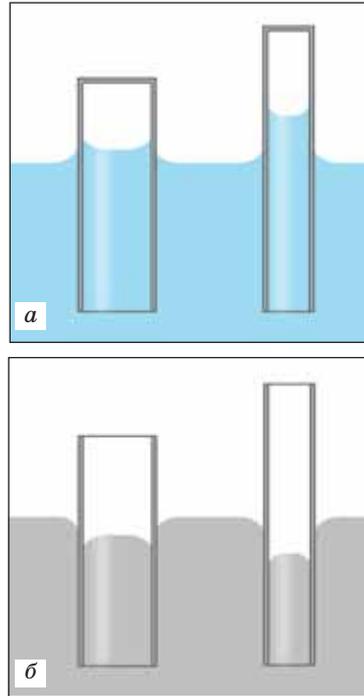


Рис. 30

¹ От латинского *capillaris* – волосной.

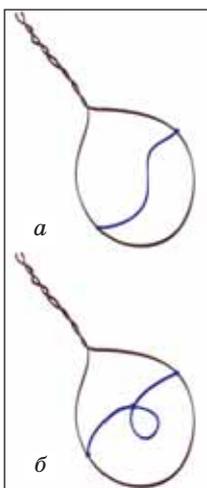


Рис. 31

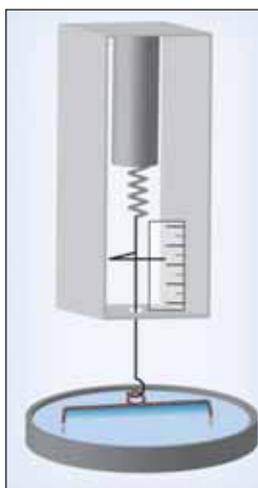


Рис. 32

8.1 ● Из проволоки изготовьте кольцо и привяжите к нему нитку так, как это показано на рисунке 31, а, б. Поместив кольцо в мыльный раствор, добейтесь того, чтобы мыльная плёнка затягивала кольцо. Проткните плёнку с одной стороны нити или внутри нижнего кольца. Объясните наблюдаемые явления.

8.2 ● Налейте в тарелку воду и положите на воду мелкие кусочки спички. Прикоснитесь мылом к воде – кусочки спички придут в движение. Почему? Сравните поверхностное натяжение чистой воды, мыльного раствора, солёной воды, сахарного сиропа, спирта или одеколona.

8.3 ● К крючку чувствительного динамометра, закреплённого вертикально, при-

крепили проволоку длиной 50 мм, расположенную горизонтально (рис. 32). Указатель прибора сместили на нуль шкалы. Чашку с чистой водой поднесли к проволочке так, чтобы она «прилипла» к воде, и начали аккуратно опускать чашку вниз. Какое значение силы покажет динамометр в момент отрыва проволочки от воды?



8.4. Почему горячий мыльный раствор моет лучше, чем холодный? Подготовьте сообщение по теме «Как действуют мыло и стиральный порошок».

8.5 ● На какую высоту поднимется вода между параллельными стеклянными пластинками, находящимися на расстоянии 0,25 мм друг от друга, в случае их полного смачивания? (Примечание. При полном смачивании можно считать, что сила поверхностного натяжения параллельна поверхности твёрдого тела.)

§ 9. ТВЁРДЫЕ ТЕЛА

В каждом камне написана его история, надо только суметь её прочесть.

*Александр Евгеньевич Ферсман (1883–1945),
один из основоположников геохимии, академик*



Вы уже знаете, что твёрдые тела сохраняют и объём, и форму.

Кристаллы. Свойства твёрдого тела обусловлены величиной взаимодействия, характером движения и особенностями расположения частиц тела. Силы межмолекулярного взаимодействия между частицами твёрдого тела велики по сравнению с силами взаимодействия между молекулами жидкости. По этой причине твёрдое тело сохраняет не только свой объём, но и свою форму. Чтобы деформировать (изменить форму) железный гвоздь или деревянную рейку, необходимо приложить определённую силу.

Явление диффузии, которое наблюдается и для твёрдых тел, подтверждает существование теплового движения частиц твёрдого тела. Как вам известно, частицы твёрдого тела совершают колебания вблизи положений равновесия. Чем больше энергия и амплитуда таких колебаний, тем выше температура твёрдого тела.

В большинстве случаев частицы твёрдого тела располагаются в определённом порядке, образуя так называемую *кристаллическую решётку*. На рисунке 33 изображены в качестве примера кристаллические решётки поваренной соли, графита и алмаза. Учёными установлено, что всего в природе кристаллические тела могут иметь 230 различных типов кристаллических решёток – вариантов расположения частиц в твёрдом теле.

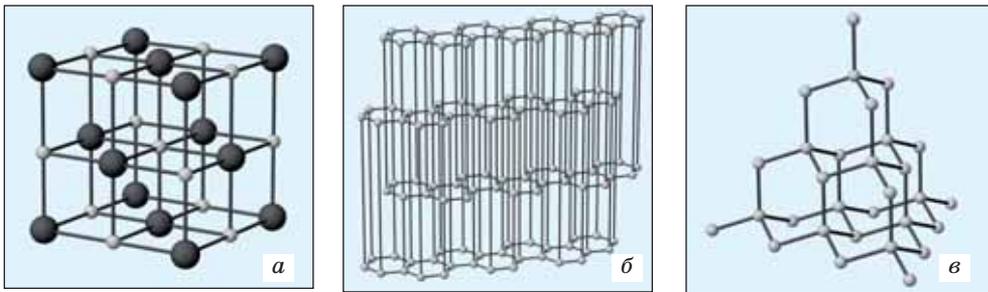


Рис. 33. Модели кристаллических решёток различных веществ. Частицы вещества изображены условно в виде шариков, силы их взаимодействия – как стержни, соединяющие частицы:

- a* – кристаллическая решётка поваренной соли;
- б* – кристаллическая решётка графита (углерод);
- в* – кристаллическая решётка алмаза (углерод).

Пример углерода показывает, что одно и то же вещество может иметь различные кристаллические модификации (разновидности). Различные кристаллические модификации наблюдаются практически у всех веществ в твёрдом состоянии.



9.1. Какие ещё кристаллические модификации вам известны?

Железную проволоку длиной примерно 1,5 м расположим горизонтально – один конец проволоки закрепим в неподвижном штативе, а другой перебросим через блок (рис. 34). Включим проволоку в электрическую цепь, подадим такое напряжение, чтобы проволока была нагрета проходящим током докрасна. При нагревании проволока удлиняется – это заметно по повороту стрелки-указателя, прикрепленной к блоку (рис. 34). Выключим ток, железная проволока постепенно охлаждается, её длина плавно уменьшается. Однако в некоторый момент времени проволока резко удлиняется, стрелка-



Рис. 34

указатель скачком поворачивается в противоположную сторону, и лишь затем охлаждение проволоки и уменьшение её длины идёт в прежнем порядке. Что же произошло? Наблюдающийся скачок в изменении длины проволоки обусловлен тем, что в процессе охлаждения железа наступает момент, когда происходит быстрое изменение кристаллической структуры железа. При этом в железе меняется характер межатомных связей, система

переходит в состояние с меньшей энергией. Выделяющийся «избыток» энергии межатомного взаимодействия приводит к кратковременному нагреванию проволоки и её скачкообразному расширению.

Основная характерная черта кристаллов – это *анизотропия*.

Анизотропия кристаллов – зависимость физических свойств кристалла от направления.

Общеизвестный пример анизотропии – различная механическая прочность кристаллов по разным направлениям. Например, графит (рис. 33, б) имеет слоистую структуру, в каждом слое атомы располагаются в вершинах правильных шестиугольников. Расстояние между слоями в 2, 4 раза больше, чем между атомами, расположенными в вершинах шестиугольников. По этой причине графит легко разделяется послойно.



9.2. Какое практическое применение нашла анизотропия механической прочности графита?

Вот ещё один яркий пример анизотропии кристаллов. Направим свет лазера на прозрачный кристалл исландского шпата (рис. 35). Будем поворачивать кристалл. В зависимости от ориентации кристалла характер прохождения света изменяется.

Как правило, в обычных условиях для твёрдых тел, имеющих кристаллическое строение, например для металлов, явление анизотропии не наблюдается. Если взять железный кубик, то он одинаковым образом проводит тепло, звук или деформируется вне зависимости от направления воздействия. Почему? Дело в том, что в большинстве случаев кристаллическое твёрдое тело – это не один кристалл, а множество сросшихся маленьких кристаллов, которые ориентированы по отношению друг к другу совершенно произвольным образом. Вот этот беспорядок в расположении кристалликов и «затушёвывает» анизотропию.

Лабораторная работа «Наблюдение процесса роста кристаллов».

Оборудование: микроскоп, предметные стёкла, стеклянные палочки, растворы поваренной соли, медного купороса, бихромата аммония, гидрохинона, миллиметровая бумага.

Указания к работе:



Задание 1. При выполнении лабораторной работы вам необходимо, используя микроскоп, пронаблюдать процесс роста кристаллов различных веществ. В работе удобно использовать микроскоп с 80-кратным увеличением (объектив с 8-кратным и окуляр с 10-кратным увеличением). Поместите на столик микроскопа предметное стекло, отрегулируйте освещение и вращением микрометрического винта добейтесь получения чёткого изображения поверхности предметного стекла. Наводку на резкость можно облегчить нанесением на поверхность стекла метки карандашом. (При наводке на резкость винт следует вращать осторожно, не допуская повреждения объектива при соприкосновении с предметным стеклом.)

Выньте предметное стекло из зажимов и поместите на него с помощью стеклянной палочки каплю раствора поваренной соли. Поместите стекло с каплей под объектив микроскопа так, чтобы в поле зрения был виден край капли, так как первые кристаллы образуются обычно на краю капли.

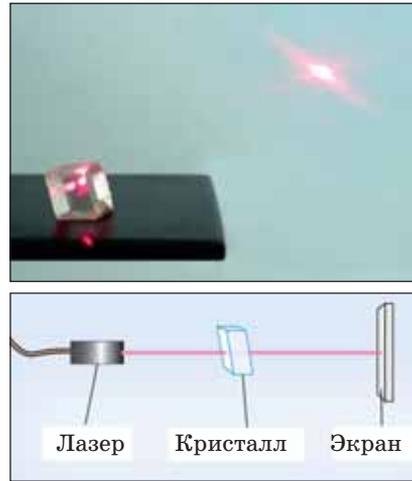


Рис. 35

Пронаблюдайте процесс зарождения и роста кристаллов. Результаты наблюдения занесите в отчёт по лабораторной работе, который должен содержать описание процесса роста кристаллов, зарисовку картины, видимой в микроскоп.



Задание 2. Используя растворы других веществ, выполните наблюдения и зарисовки роста кристаллов.



Задание 3. Поместите на предметное стекло с помощью стеклянной палочки каплю раствора поваренной соли. Положите листок миллиметровой бумаги возле покровного стекла. Глядя одним глазом в окуляр микроскопа, а другим глазом на миллиметровую бумагу, добейтесь того, чтобы изображение растущих кристаллов наблюдалось вами на фоне миллиметровой бумаги. Расположите миллиметровую бумагу так, чтобы линии на миллиметровой бумаге были параллельны одной из граней растущего кристалла.

Измерьте время, за которое грань кристалла вырастет на 1, 2, 3, 4 мм. Зная, что увеличение микроскопа равняется 80, определите реальную скорость роста кристалла, то есть прирост грани кристалла за 1 с.



9.3. Является ли скорость роста кристалла постоянной или убывает с течением времени?

Роль дефектов в кристаллах. При образовании и дальнейшем росте кристалла в большинстве случаев возникает не идеальная кристаллическая структура, а структура, имеющая определённые нарушения в расположении частиц. Нарушения правильного расположения частиц в узлах кристаллической решётки принято называть *дефектами в кристаллах*.



Примеры простейших (точечных) дефектов приведены на рисунке 36, а, б, в.

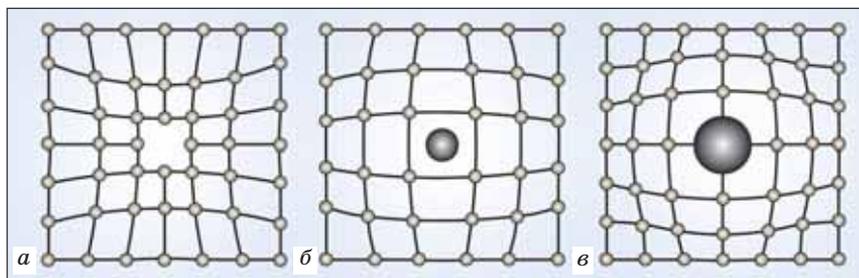


Рис. 36. Схема точечных дефектов в кристаллах:

а – отсутствие атома в одном из узлов кристаллической решётки;

б – внедрение атома между узлами кристаллической решётки;

в – замещение собственного атома кристаллической решётки примесным атомом.

Точечные дефекты влияют на свойства кристаллов. Вспомните, например, как меняется электрическое сопротивление кристаллов полупроводников германия и кремния при наличии примеси.



9.4. Что такое полупроводники *n*-типа и полупроводники *p*-типа?

Существенное значение имеют линейные дефекты, называемые *дислокациями*. *Винтовая дислокация* – смещение атомных слоёв, выходящее на поверхность кристалла (рис. 37).

Винтовая дислокация-ступенька является благоприятным условием для роста кристалла. Ведь если атому необходимо закрепиться на завершённой кристаллической плоскости, открыв рост нового слоя кристалла, то он будет связан с минимальным числом атомов кристалла (рис. 38, *а*). Такая связь слаба, часто разрушается при тепловом движении частиц, и рост кристалла затруднён. При наличии винтовой дислокации новые атомы пристраиваются к ступеньке (рис. 38, *б*). Атомы наращивают ступеньку, образуя винтовую башенку на грани кристалла (рис. 39, *а, б, в*). Нижние «этажи» башенки со временем «застраиваются» – заполняются атомами, образуя завершённый кристаллический слой.

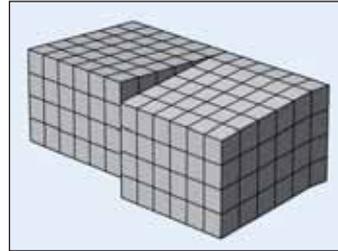


Рис. 37

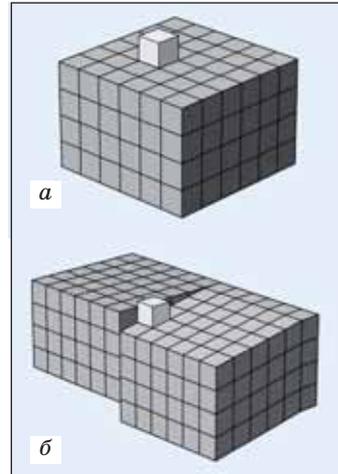


Рис. 38

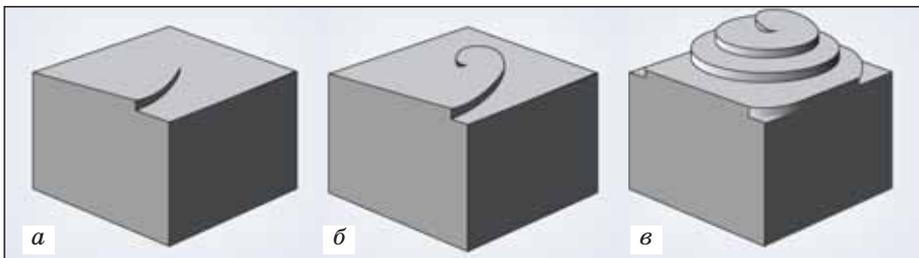


Рис. 39

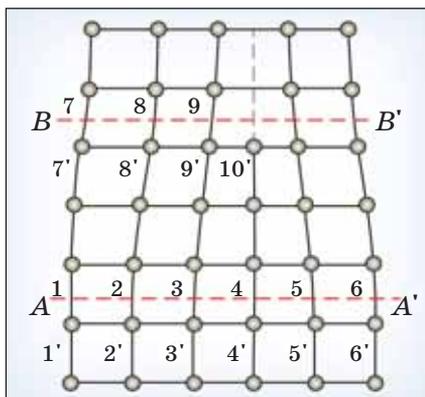


Рис. 40

Другой вид линейного дефекта – краевая дислокация. *Краевая дислокация* возникает, если одна из атомных плоскостей обрывается внутри кристалла (рис. 40). Такого типа дефекты сильно влияют на прочность кристаллов. В случае идеального кристалла для деформаций кристалла смещения вдоль плоскости AA' (рис. 40) необходим одномоментный разрыв всех межатомных связей $1 - 1'$, $2 - 2'$, $3 - 3'$. Если же в кристалле имеется краевая дислокация, то для осуществления деформации смещения вдоль плоскости BB' необходимо «перемыкание» связей – вначале $9 - 10'$, затем $8 - 9'$, затем $7 - 8'$ и так далее. Осуществлять такой поочерёдный разрыв связей значительно легче, следовательно, прочность кристалла снижается.

Приведём известное образное сравнение, иллюстрирующее данную ситуацию. Представьте, что вам необходимо передвинуть тяжёлый ковёр, лежащий на полу, – задача затруднительна. Но если вдоль одной из сторон ковра проходит складка, то, толкая складку, вы легко выполните поставленную задачу и без особых усилий передвинете ковёр. Так и в кристалле, благодаря перемещению «складки» – краевой дислокации – осуществляется сдвиг атомных слоёв кристалла – его деформация.

Для получения сверхпрочных материалов необходимы кристаллы с минимальным числом дефектов. Но получение таких, практически идеальных, кристаллов – процесс и трудоёмкий, и дорогостоящий. Поэтому для получения высокопрочных материалов идут по пути не понижения, а увеличения концентрации дефектов в кристалле!

Вновь обратимся к примеру с ковром. Если на ковре образуются две взаимно перпендикулярные складки, то они будут мешать движению друг друга и ковёр опять будет сложно передвинуть. В кристалле препятствием, затрудняющим перемещение дислокаций, являются другие дислокации, искажения кристаллической решётки за счёт примеси и иные дефекты. Например, при добавлении в железо менее 2 % углерода получают намного более прочный и твёрдый материал – сталь. Дополнительно качество стали повышают легированием – введением в расплав добавок хрома, никеля, меди, вольфрама и других металлов.

Латунную¹ пластинку плотно зажмём в лапке штатива (рис. 41, а). С помощью прочной нити к свободному концу пластинки подвесим груз и заметим, как существенно прогнулась пластинка. После этого вынем пластинку из лапки штатива, положим на железную пластину – «наковальню» и быстрыми ударами молотка проведём по всей поверхности пластинки наклёп – обработаем поверхность сравнительно лёгкими ударами так, чтобы она осталась ровной, без заметных вмятин.

Снова зажмём пластинку, подвесим тот же груз и убедимся, что пластинка стала более упругой (рис. 41, б).

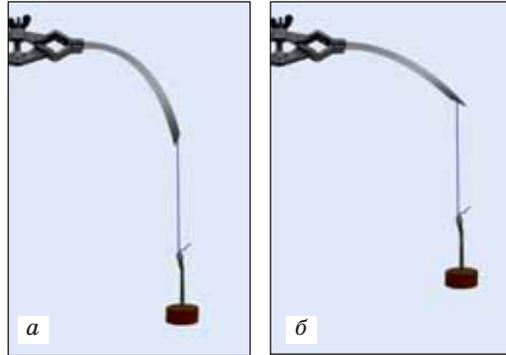


Рис. 41



9.5. Почему после механической обработки упругие свойства латуни изменились?

Проведя механическую обработку, мы увеличили число дефектов в латунной пластинке. При большом числе дефектов они препятствуют смещению кристаллических слоёв твёрдого тела, и по этой причине упругие свойства твёрдого тела возрастают.

Жидкие кристаллы. Словосочетание «жидкие кристаллы» звучит парадоксально. Ведь произнося слово «кристалл», мы представляем твёрдое тело, в котором частицы (ионы, атомы, молекулы) образуют строго определённую периодически повторяющуюся структуру, лишь отчасти нарушаемую дефектами. В жидкости же лишь ближайшие «соседи» каждой молекулы располагаются в каком-либо порядке. В отличие от твёрдых кристаллических тел жидкости обладают свойством текучести.

Но главная отличительная черта кристаллического состояния – это анизотропия. И именно свойством анизотропии обладают жидкие кристаллы.

К жидким кристаллам относятся некоторые органические вещества, молекулы которых, как правило, имеют вытянутую «макароноподобную» форму. В определённом для каждого жидкокристаллического вещества диапазоне температур это вещество одновременно и жидкость (обладает текучестью), и кристалл (обладает анизотропией).

¹ Латунь – сплав меди (основа) с цинком, часто с добавками других элементов.

Порядок расположения молекул в жидких кристаллах схематически представлен на рисунке 42, *а, б, в*.



9.6. Почему при повышении температуры до некоторого предела жидкие кристаллы переходят в состояние обычной жидкости?

Жидкие кристаллы находят широкое практическое применение в различных технических устройствах (температурные датчики, индикаторные устройства, оптические элементы экранов ЖК-телевизоров и т. д.). Это обусловлено сильной зависимостью свойств жидких кристаллов от внешних воздействий (температура, давление, электрическое и магнитное поля).

Например, увеличение температуры даже на сотую долю градуса приводит к изменению спиральной структуры жидких кристаллов (рис. 42, *в*). «Изменившиеся» кристаллы иным образом отражают свет, и их цвет меняется.

Используя плёнку такого вещества, можно определять температуру отдельных участков тела человека при медицинской диагностике воспалительных процессов. Нанеся такую плёнку на поверхность микросхемы, можно контролировать её температуру в процессе работы.

Наиболее важные практические применения основаны на электрооптических свойствах жидких кристаллов. Поместим тонкий слой жидкокристаллического вещества между двумя прозрачными и проводящими электричество плёнками. Эти плёнки являются пластинами своеобразного конденсатора. Если на пластины конденсатора подать электрическое напряжение, то под действием электрического поля ориентация молекул в жидком кристалле изменится и изменится количество света, проходящего через электрооптический элемент – пиксель. Для создания цветного изображения

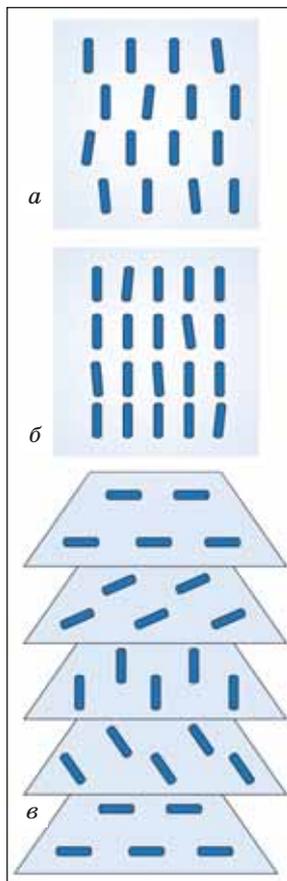


Рис. 42. Схема возможного расположения молекул в жидких кристаллах:

а – центры молекул расположены беспорядочно, но сами молекулы ориентированы параллельно друг другу;
б – молекулы ориентированы одинаково и расположены послойно, слои параллельны друг другу;
в – молекулы расположены равномерно, их ориентация образует спиральную структуру.

падающий на пиксель белый свет пропускают через красный, зелёный или синий светофильтры. Множество таких пиксельных триад (группы из трёх электрооптических элементов) и формирует цветное изображение на экране ЖК-монитора или телевизора.

Аморфные тела. Среди тел, которые сохраняют свою форму и объём и которые мы традиционно относим к твёрдым телам, имеются тела с *некристаллическим состоянием вещества*. Такое состояние называют *аморфным*¹ *состоянием*. К аморфным телам относятся, например, стекло, канифоль, янтарь. При низких температурах аморфные тела, как и твёрдые тела, проявляют упругие свойства, деформируются, при резком ударе могут расколоться на куски. При повышении температуры аморфные тела постепенно размягчаются, становится заметной их текучесть. По внутреннему строению – по расположению частиц и характеру их движения – аморфное состояние вещества ближе к жидкости, чем к твёрдому телу. Одинаковость свойств по различным направлениям (изотропия), отсутствие определённой температуры плавления указывают на отсутствие кристаллической структуры у аморфного тела. Текучесть аморфных тел свидетельствует о «жидкостном» характере движения частиц – перескоке частиц, подобно тому как это происходит в жидкости. Всё это позволяет рассматривать аморфное состояние вещества, образно говоря, как сверхвязкую жидкость.

Полимеры. Особую группу тел составляют *полимеры*² – аморфные и кристаллические высокомолекулярные соединения. Молекулы полимеров состоят из большого числа повторяющихся групп атомов, соединённых химическими связями. Молярная масса вещества полимера может достигать нескольких тонн на моль! Макромолекула полимера может представлять собой по форме цепь, цепь с разветвлениями или сетку.

По происхождению полимеры делят на природные (биополимеры) и синтетические. Биополимеры составляют основу всех живых организмов. К природным полимерным материалам относятся, например, кожа, мех, шерсть, шёлк, хлопок. Искусственные полимеры – основа различных пластмасс, химических волокон, резин, лакокрасочных материалов, клеев, герметиков. Механическая прочность, лёгкость, высокие электроизоляционные качества, относительная дешевизна обуславливают самое широкое применение синтетических полимеров в различных отраслях промышленности и быту.

¹ От греческого *amorphos* – бесформенный.

² От греческого *polymerēs* – состоящий из многих частей, многообразный.

Кристаллы, анизотропия кристалла, дефекты в кристаллах, точечные дефекты, дислокации, влияние дефектов на скорость роста кристаллов и прочность кристаллов, жидкие кристаллы, аморфные тела, полимеры.

9.1 ● От куска природного гипса отщепили пластинку и покрыли тонким слоем парафина. Если раскалить конец стальной иглы и прикоснуться остриём к поверхности гипса, то образуется «проталина» овальной формы. Если повторить опыт 3–4 раза, то можно убедиться, что все «проталины», образующиеся в расплавленном парафине, имеют овальную форму и все они оказываются вытянутыми в одном и том же направлении. Почему?

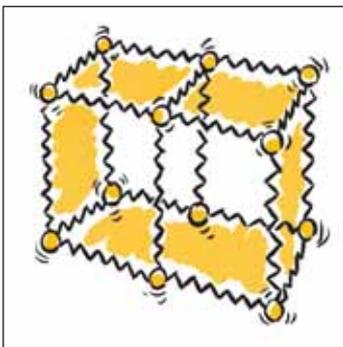
9.2 ● Какие особенности внутреннего строения стекла способствовали возникновению профессии стеклодува?

9.3 ● Сравните кристаллические твёрдые тела, аморфные тела и полимеры.

9.4 ● В 1924 г. в опытах, проведённых академиком Иоффе с сотрудниками, было выяснено, что прочность кристалла каменной соли на разрыв увеличивается более чем в 300 раз, если измерения проводить с кристаллами, погружёнными в раствор каменной соли. Предложите объяснение наблюдавшегося явления.

9.5 ● Полиэтилен – полимер, имеющий химическую формулу $[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-]_n$, где n – степень полимеризации. Молярная масса полимера от 50 до 3000 кг/моль. Оцените, в каких пределах находится значение степени полимеризации n .

§ 10. УПРУГИЕ СВОЙСТВА ТВЁРДЫХ ТЕЛ



Где тонко, там и рвётся.
Русская пословица

Вы уже знаете, что при деформации твёрдого тела возникает сила упругости.

Закон Гука. Изогнём металлическую линейку, сдавим кусок резины – под действием внешних сил тела деформируются. *Механическая деформация* – изменение взаимного расположения частиц тела. Перечислим виды деформаций: сжатие, растяжение, сдвиг, изгиб, кручение.

Различают *упругие* и *пластические деформации*. Деформация называется упругой, если она возникает под действием внешней нагрузки и исчезает после её снятия, то есть форма и размеры тела принимают прежние значения. При пластической деформации тело, после того как оно подверглось внешнему воздействию, не принимает прежней формы. Изгиб стальной линейки, сжатие куска резины – примеры деформаций, которые можно отнести к упругим. Расплющенная ударом молотка монета, сжатие куска пластилина так, что в нём остались вмятины, – примеры пластических деформаций.

При деформации возникает сила упругости. При растяжении твёрдого тела увеличивается межатомное расстояние, и частицы твёрдого тела притягиваются друг к другу; при сжатии межатомное расстояние уменьшается, и частицы твёрдого тела отталкиваются друг от друга. Зависимость силы упругости от величины деформации наиболее простой вид имеет в случае малых деформаций: **сила упругости, возникающая при деформации тела, прямо пропорциональна величине деформации**. Этот основной закон теории упругости был установлен известным английским естествоиспытателем, учёным-энциклопедистом Робертом Гуком (1635–1703).

Возьмём твёрдое тело в форме прямоугольного параллелепипеда (стержня), закрепим одну из граней твёрдого тела и деформируем его вдоль одной из сторон (рис. 43). При деформации растяжения или сжатия слои твёрдого тела сместятся параллельно друг другу. Пусть общая величина деформации (растяжения или сжатия) составляет x . В случае малой упругой деформации растяжения или сжатия твёрдого тела математическое выражение закона Гука имеет вид

$$F_{упр} = -kx, \quad (10.1)$$

где k – жёсткость тела.

Знак «минус» в формуле закона Гука, как известно, указывает на то, что проекции перемещения слоёв твёрдого тела и силы упругости на ось X (рис. 43) имеют противоположные знаки. При вычислении модуля силы упругости необходимо, очевидно, воспользоваться формулой

$$|F_{упр}| = k|x|. \quad (10.2)$$

Жёсткость зависит от упругих свойств, которые у твёрдых тел неодинаковы, так как неодинаковы силы межатомного взаимодействия в различных веществах. Также жёсткость зависит от размеров тела. Чем больше площадь поперечного сечения стержня s (рис. 43), тем жёсткость больше. Это очевидно: ведь при большей площади поперечного сечения большее число атомов «задействовано» в создании силы упругости.

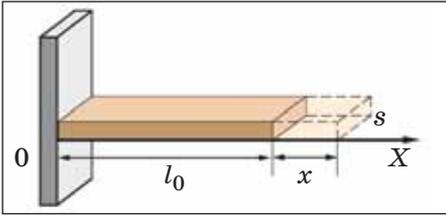


Рис. 43

Если же при деформации тела возникает большая сила упругости, то, следовательно, и жёсткость больше:

$$k \sim s.$$

Чем больше первоначальная длина стержня l_0 (рис. 43), тем жёсткость меньше. Почему? Чем больше первоначальная длина стержня,

тем из большего участка межатомных слоёв он состоит. Следовательно, при деформации расстояние между двумя соседними слоями изменится незначительно, а значит, и сила упругости будет мала. Если при деформации тела возникает малая сила упругости, то, следовательно, и жёсткость мала:

$$k \sim 1/l_0.$$

Предел прочности. Для того чтобы охарактеризовать силу упругости, возникающую при деформации твёрдого тела, введена физическая величина *механическое напряжение* (или просто *напряжение*). Пусть твёрдое тело имеет форму стержня (рис. 43), который подвергается деформации растяжения или сжатия. В этом случае механическим напряжением называют отношение модуля силы упругости к площади поперечного сечения тела.

Обозначим механическое напряжение буквой σ (читается: сигма).

$$\sigma = \frac{|F_{\text{упр}}|}{S}. \quad (10.3)$$

Единица механического напряжения – паскаль (сокращённо обозначается Па).



10.1. Какая физическая величина также измеряется в паскалях?

Чем больше растянуто (или сжато) твёрдое тело, тем больше возникающая при деформации сила упругости, а значит, тем больше и механическое напряжение. При дальнейшем увеличении нагрузки, приложенной к телу, механическое напряжение будет всё больше и больше. Упругие деформации сменяются пластическими, начнётся необратимое удлинение твёрдого тела, и при достижении некоторого определённого значения механического напряжения произойдёт разрушение твёрдого тела. **Максимальное значение механического напряжения, при достижении которого происходит разрушение твёрдого тела, называют пределом прочности.**

Значения предела прочности $\sigma_{пч}$ некоторых материалов при растяжении приведены в таблице 7.

Таблица 7. Предел прочности некоторых материалов при растяжении (ориентировочные значения), ГПа

Алюминий	0,05–0,11	Паутина	0,18
Железо	0,17–0,21	Серебро	0,14
Золото	0,14	Сталь легированная хромистая	0,80
Капрон	0,055–0,080	Стекло	0,06–0,12
Латунь	0,30–0,60	Струна рояльная	1,86–2,33
Нихром	0,65–0,70	Шёлковая нить	0,26

Используя понятие «предел прочности», оценим, например, какая максимально возможная высота гор на Земле. Будем исходить из следующих данных: предел прочности гранита составляет около 250 МПа, плотность гранита 2700 кг/м³.

Мысленно выделим из горного массива прямоугольный параллелепипед – колонну высотой H и площадью основания s (рис. 44).

Масса m такой колонны равна

$$m = \rho V,$$

где ρ – плотность гранита;

V – объём колонны.

Объём колонны легко определить:

$$V = Hs.$$

Тогда

$$m = \rho Hs.$$

На колонну массой m действует сила тяжести $F_{тяж} = mg$, или

$$F_{тяж} = \rho Hsg. \quad (10.4)$$

Сила тяжести, действующая на колонну, уравновешивается силой упругости $F_{упр}$, возникающей при деформации основания колонны:

$$F_{тяж} = F_{упр}. \quad (10.5)$$

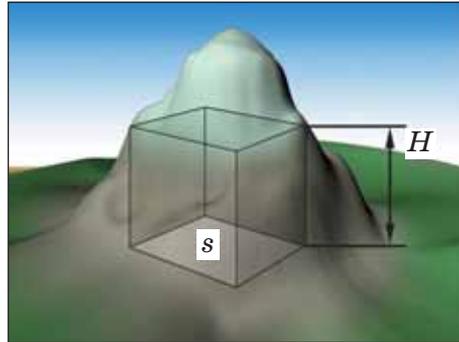


Рис. 44

Силу упругости определим, воспользовавшись соотношением (10.3):

$$F_{\text{упр}} = \sigma s. \quad (10.6)$$

Из выражений (10.4) – (10.6) получим

$$\rho H s g = \sigma s,$$

$$\rho g H = \sigma.$$

Но механическое напряжение σ не может быть больше, чем предел прочности $\sigma_{\text{нч}}$:

$$\rho g H = \sigma_{\text{нч}}.$$

Отсюда

$$H = \frac{\sigma_{\text{нч}}}{\rho g},$$

$$H = \frac{250 \cdot 10^6 \text{ Па}}{2700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = 9500 \text{ м}.$$

Действия с единицами измерений:

$$\frac{\text{Па}}{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^2}{\text{кг} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{кг}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{м}^2 \cdot \text{кг}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{кг}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{кг}} = \text{м}.$$

Как видим, высота высочайшей горной вершины Эверест (8848 м) практически совпадает с максимально возможной высотой гор на Земле.



10.2. Самый высокий вулкан в Солнечной системе – гора Олимп на Марсе (около 25 км). Почему горы на Марсе выше, чем на Земле?



10.3. Почему на суше нет животных крупнее слона? Почему самые крупные животные обитают в океане?

Предел прочности – практически важная физическая величина. При конструировании различных сооружений – мостов, туннелей, зданий – конструкторам и архитекторам должен быть известен и учитываться предел прочности используемых материалов. Более того, при проектировании учитывается необходимый *запас прочности*, то есть добиваются того, чтобы максимальное механическое напряжение, испытываемое деталью конструкции, было в несколько раз меньше предела прочности. Величина коэффициента запаса прочности, как правило, выбирается от 1,3 до 6 и выше. Наименьшие значения применяются для деталей, которые изготавливаются из высококачественных материалов при необходимости снижения веса конструкции, а наибольшие – для тех деталей, которые испытывают динамические (ударные) нагрузки.

Лабораторная работа «Определение предела прочности металла».

Оборудование: куски медной проволоки различной толщины, рычаг лабораторный с осью, измерительная линейка, динамометр лабораторный, штангенциркуль, штатив с муфтой и лапкой.

Указания к работе:



Задание 1. Определение предела прочности меди $\sigma_{нч}$ при растяжении.

1. Измерьте диаметр медной проволоки D штангенциркулем. Вычислите площадь поперечного сечения проволоки s .

2. Закрепите рычаг на оси в муфте штатива. Закрепите лапку от штатива на торцевой кромке лабораторного стола. Прикрепите медную проволоку одним концом к лапке штатива, а другим концом — к левому плечу рычага. Подвесьте к правому плечу рычага динамометр (рис. 45).

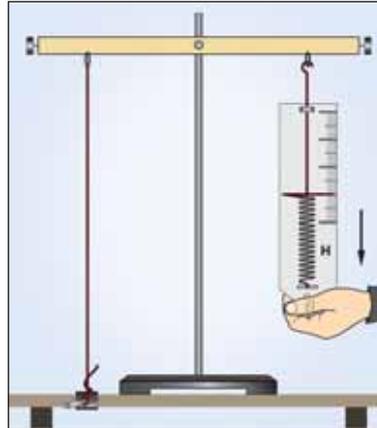


Рис. 45



10.4. Как формулируется условие равновесия рычага?

3. Потяните динамометр вертикально вниз, подействовав силой на правое плечо рычага. Заметьте показание динамометра, при котором происходит разрыв проволоки $F_{дин}$.

4. Вычислите предел прочности меди при растяжении. Максимальная сила упругости $F_{упр}$, действующая на левое плечо рычага, равна

$$F_{упр} = \sigma_{нч} s. \quad (10.7)$$

Известно, что рычаг находится в равновесии, когда

$$F_{упр} d_1 = F_{дин} d_2,$$

где d_1 и d_2 — плечи сил $F_{упр}$ и $F_{дин}$ соответственно (рис. 45).

С учётом соотношения (10.7) имеем

$$\sigma_{нч} s d_1 = F_{дин} d_2.$$

Отсюда

$$\sigma_{нч} = \frac{F_{дин} d_2}{s d_1}.$$



Задание 2. Повторите измерения с медной проволокой другого диаметра. Сравните результаты, полученные при выполнении заданий 1 и 2.

Задание 3. Вычислите абсолютную погрешность косвенного измерения предела прочности меди при растяжении.

Механическая деформация, упругие и пластические деформации, закон Гука, жёсткость, зависимость жёсткости от упругих свойств материала и размеров тела, механическое напряжение, предел прочности, запас прочности.

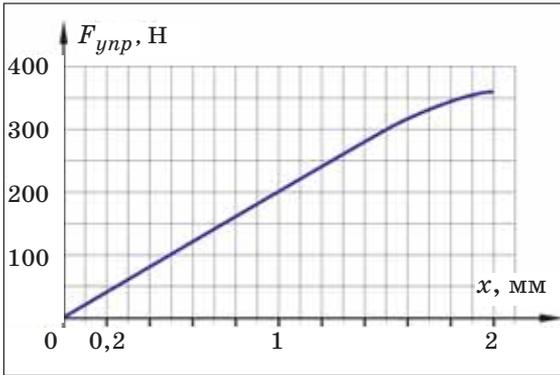


Рис. 46

10.1 ● На рисунке 46 изображён график зависимости модуля силы упругости $F_{упр}$, возникающей при растяжении стальной проволоки, от величины растяжения x . Определите жёсткость проволоки. Почему при большой величине деформации сила упругости не прямо пропорциональна величине деформации?

10.2 ● К свободному концу закреплённой вертикально серебряной проволоки с площадью поперечного сечения $0,2 \text{ мм}^2$ прикрепили груз массой 3 кг . Выдержит ли проволока такую нагрузку?

10.3 ● Оцените наибольшую высоту стены, которую можно построить из кирпича, если предел прочности кирпича на сжатие 10 МПа , предел прочности кирпича на изгиб 2 МПа , плотность кирпича 1500 кг/м^3 . Учтите, что поверхность кирпича и шва кладки не идеально плоская и вследствие этого давление в кладке вызывает, помимо напряжения сжатия, ещё и напряжение изгиба.

10.4 ● Стальной трос свивается из 7 проволок, изготовленных из нержавеющей стали, имеющей предел прочности при растяжении 750 МПа . Какого диаметра следует использовать проволоку, чтобы такой трос можно было бы использовать в лебёдке, рассчитанной на подъём груза массой не более 150 кг при коэффициенте запаса прочности $1,8$?

10.5 ● В произведении английского писателя Джонатана Свифта (1667–1745) «Путешествие Гулливера» описывается путешествие главного героя в страну великанов, которые в 12 раз больше нормального человека. Возможно ли существование таких существ на Земле? Ответ обосновать.

§ 11. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ



Во всех случаях, когда из теплоты появляется работа, тратится пропорциональное полученной работе количество тепла, и наоборот, при затрате той же работы получается то же количество теплоты.

*Из книги «Механическая теория тепла» немецкого физика, одного из основателей термодинамики и кинетической теории газов
Рудольфа Юлиуса Эмануэля Клаузиуса
(1822–1888)*

Вам уже известны понятия внутренняя энергия, количество теплоты, механическая работа.

Внутренняя энергия. Пусть идеальный одноатомный газ находится в баллоне и его абсолютная температура равна T . Тогда средняя энергия \bar{E} теплового движения молекулы газа равна

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT, \quad (11.1)$$

где k – постоянная Больцмана.



11.1. Чему равно численное значение постоянной Больцмана?

Вычислим энергию всех молекул газа. Обозначим эту энергию как U .

$$U = N\bar{E}, \quad (11.2)$$

где N – число молекул газа.

Число молекул газа N нетрудно определить, если известна масса газа m и его молярная масса M . Воспользуемся пропорцией

$$\frac{N}{N_A} = \frac{m}{M},$$

где N_A – постоянная Авогадро.



11.2. Чему равно численное значение постоянной Авогадро?

Отсюда

$$N = \frac{m}{M} N_A. \quad (11.3)$$

Из соотношений (11.1) – (11.3) имеем

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} N_A kT.$$

Вспомним, что

$$N_A k = R,$$

где R – газовая постоянная.



11.3. Чему равно численное значение газовой постоянной?

Окончательно имеем

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT. \quad (11.4)$$

Отношение массы газа m к его молярной массе M равно количеству вещества ν :

$$\nu = \frac{m}{M}.$$

Это позволяет записать формулу (11.4) в ином виде:

$$U = \frac{3}{2} \nu RT. \quad (11.5)$$

Пусть в баллоне имеется 1 моль газа ($\nu = 1$ моль), температура газа соответствует комнатной ($t = 18^\circ\text{C}$).

Тогда

$$U = \frac{3}{2} \cdot 1 \text{ моль} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 291 \text{ К} = 3630 \text{ Дж},$$

$$U = 3,63 \text{ кДж}.$$

На столько килоджоулей увеличится потенциальная энергия 16-килограммовой гири при подъёме её с 1 этажа на высоту 7–8-го этажа! Проведённый нами расчёт свидетельствует о том, что тепловое движение молекул макроскопического тела является заметной «кладовой» энергии и, безусловно, её необходимо практически использовать.

Наука о наиболее общих свойствах макроскопических систем (совокупности макротел) и закономерностях превращения энергии в таких системах называется **термодинамикой**. Макроскопические системы при изучении их в рамках термодинамики принято называть *термодинамическими системами*. Основы термодинамики были заложены в первой четверти XIX века при анализе принципа действия тепловых машин. В дальнейшем круг вопросов, решаемых термодинамикой, существенно расширился – ведь превращение энергии наблюдается в самых разных физических процессах.

Всякая термодинамическая система характеризуется такими макропараметрами, как абсолютная температура, давление, объём, масса. В термодинамике макропараметры называют *термодинамическими параметрами*. Помимо абсолютной температуры, давления, объёма, массы одним из основных термодинамических параметров является *внутренняя энергия*.

Энергия движения и взаимодействия всех частиц макроскопического тела (атомов, молекул) составляет его внутреннюю энергию.

Внутренняя энергия макроскопического тела зависит от его температуры и объёма. Действительно, ведь повышение температуры свидетельствует о росте средней энергии движения частиц тела. От объёма тела, в свою очередь, зависит расстояние между частицами тела, а значит, энергия их взаимодействия. Исключением являются газы, рассматриваемые как идеальные. В этом случае мы считаем, что потенциальная энергия молекул газа пренебрежимо мала в сравнении с их кинетической энергией теплового движения. В итоге внутренняя энергия идеального газа зависит только от температуры.

Соответствующие формулы для расчёта внутренней энергии идеального одноатомного¹ газа нами уже выведены – это формулы (11.4) и (11.5).



11.4. Зависит ли внутренняя энергия макроскопического тела от механического движения самого тела и его взаимодействия с другими телами?

Работа в термодинамике. Первоначально напомним, как понятие работы определяется в механике. Если на тело действует постоянная сила, то механическую работу A , совершённую силой, в этом случае можно рассчитать по формуле

$$A = |\vec{F}| \cdot |\vec{S}| \cos \alpha, \quad (11.6)$$

где \vec{F} – постоянная сила, приложенная к телу;

\vec{S} – перемещение тела;

α – угол между вектором силы \vec{F} и вектором перемещения \vec{S} (рис. 47).

В механике установлено, что *работа силы, действующей на тело, численно равна изменению кинетической энергии тела, произошедшему под действием этой силы.*

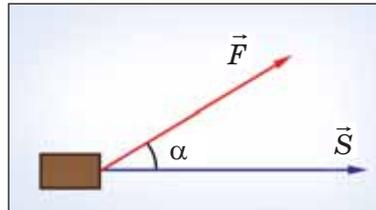


Рис. 47

$$A = E_k - E_{k0},$$

где A – механическая работа, совершённая силой;

E_k – конечная кинетическая энергия тела;

E_{k0} – начальная кинетическая энергия тела.



11.5. В каких единицах измеряется работа?

¹ Если идеальный газ является двух- или трёхатомным газом, то тогда при подсчёте внутренней энергии газа необходимо учитывать не только энергию поступательного движения молекул газа, но и энергию вращательного движения, а также энергию возможного колебательного движения атомов в молекулах.

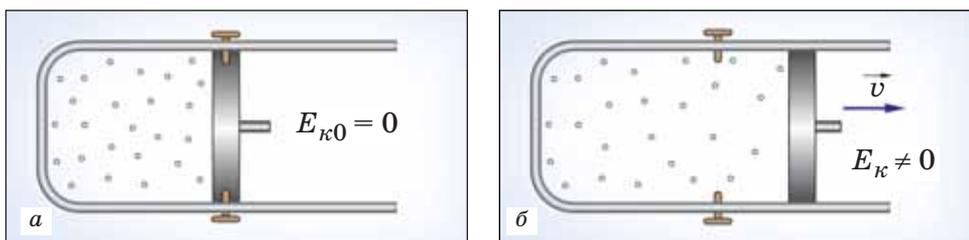


Рис. 48. Газ в баллоне под поршнем:

a – поршень неподвижен, его кинетическая энергия равна нулю;

б – поршень движется, его кинетическая энергия отлична от нуля.

Пусть газ находится в баллоне, замкнутом подвижным герметичным поршнем, который первоначально удерживается (рис. 48, *a*). Для простоты будем считать, что внешнее давление отсутствует. Предоставим поршню возможность двигаться (рис. 48, *б*). Под действием силы давления газа поршень сместится, приобретёт кинетическую энергию. Следовательно, газ, расширяясь, совершит работу.

Если газ совершил работу, увеличив кинетическую энергию поршня, то внутренняя энергия самого газа должна уменьшиться. Проверим это на опыте. На дно толстостенной стеклянной колбы капнем немного воды. К колбе подсоединим насос и плотно закроем колбу пробкой (рис. 49). Накачаем воздух в колбу. В некоторый момент под давлением воздуха пробка вылетит. Воздух расширится, и в колбе образуются водяные пары (туман), что свидетельствует о понижении температуры воздуха.

Если же газ сжимают, над газом совершают работу, то его внутренняя энергия увеличивается. На дно полого прозрачного цилиндра, изготовленного из оргстекла, опустим небольшой кусочек обугленной ваты. Закроем цилиндр поршнем (рис. 50). Резким нажимом вгоним поршень внутрь цилиндра и сожмём воздух. При сжатии воздух так сильно нагревается, что ватка воспламеняется.



Рис. 49

Итак, при совершении газом работы (или при совершении работы над газом) внутренняя энергия газа изменяется. *Какова же связь между работой газа и изменением его внутренней энергии?*

Для ответа на это вопрос воспользуемся законом сохранения

энергии. Пусть газ совершил работу $A_{газ}$, изменив кинетическую энергию поршня (рис. 48, а, б).

$$A_{газ} = E_k - E_{k0}.$$

Предположим, что никаких изменений в окружающих баллон с газом телах не произошло. Тогда увеличение кинетической энергии поршня могло произойти только за счёт убыли внутренней энергии газа на такую же величину. Обозначим начальную внутреннюю энергию макроскопического тела (газа) как U_0 , а конечную внутреннюю энергию как U . Тогда

$$U_0 - U = A_{газ}. \quad (11.7)$$

При записи физических формул часто пользуются понятием «изменение физической величины». (На практике часто возникает необходимость измерить именно изменение физической величины.) Изменение физической величины принято обозначать буквой греческого алфавита Δ (читается: дельта). Например, изменение внутренней энергии равно

$$\Delta U = U - U_0.$$

(Обратите внимание: для того чтобы определить изменение физической величины, необходимо из конечного значения величины вычесть начальное значение величины.)

Таким образом, соотношение (11.7) запишется в виде

$$-\Delta U = A_{газ}.$$

Физический смысл этого выражения вполне очевиден: при расширении газа и уменьшении его внутренней энергии ($\Delta U < 0$) газом совершается положительная работа ($A > 0$).



11.6. Чему равен угол между направлением силы давления газа и направлением перемещения поршня в случае расширения газа? Какой – положительной или отрицательной – будет работа силы давления газа, исходя из формулы (11.6)?

Количество теплоты. Можно ли изменить внутреннюю энергию тела, не совершая работы? Да. Опустите чайную ложку в стакан с кипятком. Что произойдёт? Через некоторое время температура ложки увеличится, значит, её внутренняя энергия возросла. Температура горячей воды понизится, следовательно, внутренняя энергия воды уменьшится.

Способ изменения внутренней энергии макроскопического тела без совершения работы называют теплообменом.

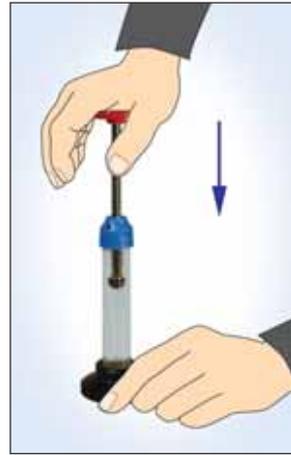


Рис. 50

Возможны различные виды теплообмена – теплопроводность, конвекция, излучение, но при любом виде теплообмена за изменение макропараметров (температура, давление, объём) «ответственны» микропроцессы. При теплопроводности и конвекции часть энергии теплового движения частиц горячего тела при столкновениях передаётся частицам более холодного тела. При излучении горячее тело испускает кванты электромагнитного излучения, которые поглощаются более холодным телом.

Энергия, которую макроскопическое тело теряет или отдаёт в результате теплообмена, называется количеством теплоты.



11.7. В каких единицах измеряется количество теплоты?

Количество теплоты обозначают буквой Q . Принято считать, что если в результате теплообмена телу передаётся энергия (количество теплоты), то $Q > 0$; если тело отдаёт некоторое количество теплоты, то $Q < 0$.

Первый закон термодинамики. Одним из наиболее фундаментальных законов природы является закон сохранения энергии. Содержание и форму, близкую к современной, закон сохранения энергии приобрёл к середине XIX века благодаря трудам немецкого естествоиспытателя, врача Юлиуса Роберта Майера (1814–1878), английского физика Джеймса Прескотта Джоуля (1818–1889), немецкого учёного Германа Людвиг Фердинанда Гельмгольца (1821–1894).

Закон сохранения энергии, распространённый на тепловые явления, называют первым законом (первым началом) термодинамики. Представим, что некоторой термодинамической системе передано количество теплоты Q . Какие изменения могут произойти в системе за счёт полученной энергии (количества теплоты)? Во-первых, может измениться энергия движения и взаимодействия молекул макроскопических тел, составляющих систему. Иными словами, может измениться внутренняя энергия системы (ΔU). Во-вторых, может измениться кинетическая энергия поршня (оболочки), замыкающего систему. Но это изменение кинетической энергии, как мы уже выяснили, равно работе, совершённой системой ($A_{газ}$).

Количество теплоты, полученное термодинамической системой, идёт на изменение её внутренней энергии и совершение системой работы над внешними телами.

$$Q = \Delta U + A_{газ}. \quad (11.8)$$



Применим первый закон термодинамики для анализа изопроцессов в идеальном одноатомном газе.

Изобарный процесс. Формула для расчёта внутренней энергии идеального одноатомного газа нам известна:

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT.$$

Тогда

$$\Delta U = U - U_0,$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT - \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT_0,$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T, \quad (11.9)$$

где $\Delta T = T - T_0$ – изменение температуры газа в рассматриваемом процессе.

В случае изобарного процесса газ действует на поршень с постоянной силой F (рис. 51).

$$F = ps,$$

где p – давление газа;

s – площадь поршня.

Работу постоянной силы можно рассчитать, если воспользоваться формулой (11.6):

$$A_{газ} = psx. \quad (11.10)$$

Здесь учтено, что модуль перемещения $|\vec{S}|$ обозначен как x , а угол между силой давления газа и перемещением равен 0 ($\cos 0 = 1$).

При расширении газа его объём изменяется на ΔV .

$$\Delta V = V - V_0,$$

где V – конечный объём газа;

V_0 – начальный объём газа.

Изменение объёма газа ΔV , очевидно, равно

$$\Delta V = sx.$$

Тогда выражение (11.9) можно записать в виде

$$A_{газ} = p \Delta V. \quad (11.11)$$

Работа газа при изобарном процессе тем больше, чем больше изменение объёма газа.

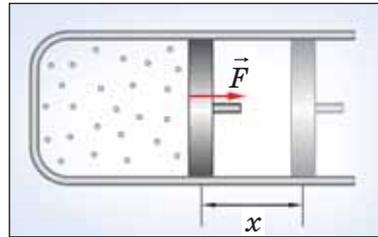


Рис. 51

Выясним, как работа газа при изобарном процессе связана с изменением его абсолютной температуры:

$$A_{газ} = p(V - V_0),$$

$$A_{газ} = pV - pV_0.$$

Воспользуемся уравнением состояния идеального газа

$$pV = \frac{m}{M} RT,$$

$$pV_0 = \frac{m}{M} RT_0$$

(учтено, что при изобарном процессе $p_0 = p$).

Тогда

$$A_{газ} = \frac{m}{M} RT - \frac{m}{M} RT_0,$$

$$A_{газ} = \frac{m}{M} R(T - T_0),$$

$$A_{газ} = \frac{m}{M} R\Delta T. \quad (11.12)$$

Из соотношений (11.8), (11.9), (11.12) окончательно получим выражение для расчёта количества теплоты при изобарном процессе:

$$Q = \frac{5}{2} \frac{m}{M} R\Delta T.$$

Изохорный процесс. Изменение внутренней энергии газа уже определено [соотношение (11.9)].

В случае изохорного процесса объём газа постоянен, следовательно, поршень не смещается и газ не совершает работу.

$$A_{газ} = 0.$$

Тогда первый закон термодинамики запишется в виде

$$Q = \Delta U,$$

или с учётом (11.8)

$$Q = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R\Delta T.$$

Изотермический процесс. В случае изотермического процесса температура газа постоянна и внутренняя энергия газа не изменяется:

$$\Delta U = 0.$$

Тогда первый закон термодинамики запишется в виде

$$Q = A_{газ}.$$



11.8. Может ли работа газа при изотермическом процессе быть вычислена по формуле (11.11)?

Адиабатный процесс. Одним из основных вопросов, рассматриваемых в термодинамике, является вопрос о возможности эффективного использования на практике энергии теплового движения молекул макроскопического тела. Каким образом за счёт внутренней энергии газа может быть совершена работа?

Из первого закона термодинамики (11.8) следует, что

$$A_{газ} = Q - \Delta U.$$

Следовательно, для того, чтобы газ совершил большую работу, необходимо передать газу некоторое количество теплоты ($Q > 0$) и внутренняя энергия газа при этом должна уменьшиться ($\Delta U < 0$).

Рассмотрим случай, когда система теплоизолирована

$$Q = 0.$$

Процесс в теплоизолированной системе называют адиабатным процессом.

Каким образом может быть осуществлён адиабатный процесс? Во-первых, адиабатным можно считать процесс, происходящий в системе с теплоизолирующей оболочкой (термос, калориметр). Во-вторых, к адиабатным можно отнести быстротекущие процессы, когда теплообмен между системой и окружающей средой не успевает произойти.



11.9. Являются ли адиабатными процессы, происходящие в опытах, изображённых на рисунках 49 и 50?

В случае адиабатного процесса

$$\begin{aligned} A_{газ} &= -\Delta U, \\ A_{газ} &= U_0 - U. \end{aligned}$$

Если происходит процесс адиабатного расширения ($A_{газ} > 0$), газ совершает работу за счёт убыли своей внутренней энергии ($U < U_0$) и, следовательно, температура газа понижается.

Грандиозные по масштабам процессы адиабатного расширения воздуха приводят к образованию облаков. В летнее время земная поверхность поглощает большую часть падающего на него солнечного излучения. По этой причине приземные слои атмосферного воздуха, подогреваемые землёй, имеют более высокую температуру, чем вышележащие слои воздуха. Менее плотный горячий воздух под действием архимедовой силы поднимается вверх и расширяется – ведь с высотой атмосферное давление уменьшается. Быстрое и практически адиабатное расширение воздушных масс, содержащих водяные пары, приводит к понижению их температуры и конденсации водяного пара. Так возникают облака, состоящие из мельчайших капель воды размером в тысячные и сотые доли миллиметра.

При адиабатном сжатии, когда работа совершается над газом ($A_{газ} < 0$), внутренняя энергия и температура газа увеличиваются. Это легко представить наглядно. Если газ сжимается, поршень движется навстречу налетающим на него молекулам газа и те после удара о поршень отлетают от него с большей скоростью – совершенно так же, как с большей скоростью отлетает теннисный мяч от ракетки, движущейся ему навстречу.

Адиабатный разогрев сжимаемого воздуха нашёл широкое применение в дизельных двигателях внутреннего сгорания, названных так в честь немецкого изобретателя Рудольфа Дизеля (1858–1913). В современных дизельных двигателях воздух сжимается в 16–25 раз, при этом температура воздуха при сжатии повышается до 600–700 °С. После завершения процесса сжатия воздуха в цилиндр двигателя впрыскивается топливо, которое воспламеняется при контакте с раскалённым воздухом. Экономичность двигателя, более высокий по сравнению с другими типами двигателей внутреннего сгорания КПД обеспечили широкое распространение дизельных двигателей на различных транспортных средствах (тепловозы, грузовики, тракторы, автобусы, суда).

Внутренняя энергия, внутренняя энергия одноатомного идеального газа, **первый закон термодинамики**, применение первого закона термодинамики к изопроцессам, **адиабатный процесс**.

- 11.1 ● Чему равна внутренняя энергия 2 моль неона при 27 °С?
- 11.2 ● Какова внутренняя энергия гелия, заполняющего шар-аэростат объёмом 18 м³ при давлении 101 кПа?
- 11.3 ● Какая работа была совершена газом, если при передаче газу количества теплоты 4,2 кДж его внутренняя энергия возросла от 7500 до 9200 Дж?
- 11.4 ● Одноатомному идеальному газу передано количество теплоты 1,6 кДж. При этом газ расширился, увеличив свой объём от 10 до 20 л, а давление газа уменьшилось от 200 до 100 кПа. Определите работу, совершённую газом.
- 11.5 ● Идеальный газ, имеющий первоначально давление p_0 и объём V_0 , расширяется, увеличивая свой объём в 4 раза. Первый раз расширение газа происходило изотермически, второй раз – адиабатно. Начертите примерные графики этих процессов в осях « p – V ». В каком из случаев газ совершает бóльшую работу? Примечание. График изотермического процесса называют изотермой, график адиабатного процесса – адиабатой.

§ 12. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ»



Старайся дать уму как можно больше пищи.
Из дневника великого русского писателя,
графа Льва Николаевича Толстого (1828–1910)

Вам уже известен первый закон термодинамики.

Задачи на первый закон термодинамики. При решении задач помимо формулы первого закона термодинамики

$$Q = \Delta U + A_{\text{газ}}$$

также применяется формула для расчёта внутренней энергии одноатомного идеального газа

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT,$$

формула для расчёта работы газа при изобарном процессе

$$A_{\text{газ}} = p\Delta V$$

и уравнение состояния идеального газа

$$pV = \frac{m}{M} RT.$$

Ещё один вид задач, связанных с первым законом термодинамики, – это задачи на так называемое уравнение теплового баланса. Если термодинамическая система является изолированной, то внутренняя энергия системы постоянна ($\Delta U = 0$) и система не совершает работы над внешними телами ($A_{\text{газ}} = 0$). Тогда из первого закона термодинамики

$$Q = \Delta U + A_{\text{газ}}$$

следует, что

$$Q = 0,$$

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots = 0,$$

где Q_1, Q_2, Q_3 и т. д. – количество теплоты, получаемое или отдаваемое телами термодинамической системы.

Задача 1. Держа насос, присоединённый к колбе, в руках за металлический корпус, экспериментатор сообщает воздуху в насосе количество теплоты 0,6 Дж (рис. 49). Вдвинув поршень в насос, он совершает работу 2,1 Дж. Чему равно изменение внутренней энергии воздуха в колбе насоса?

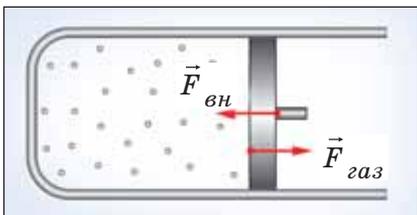


Рис. 52

Решение:

Пусть поршень движется равномерно (рис. 52). Тогда внешняя сила, приложенная к поршню $F_{вн}$, равна по модулю силе давления газа $F_{газ}$, действующей на поршень.

$$|\vec{F}_{вн}| = |\vec{F}_{газ}|.$$



12.1. Как рассчитывается работа постоянной силы, приложенной к телу?

Если газ сжимается, то, очевидно, работа внешней силы положительна (угол между силой и перемещением поршня составляет 0° , $\cos 0 = 1$). Работа, совершаемая силой давления газа, при этом отрицательна (угол между силой давления газа и перемещением поршня составляет 180° , $\cos 180^\circ = -1$).

Так как модули сил, приложенных к поршню, равны, то равны по величине и противоположны по знаку работы этих сил.

$$A_{газ} = -A_{вн}. \quad (12.1)$$

В соответствии с первым законом термодинамики

$$Q = \Delta U + A_{газ},$$

или с учётом выражения (12.1)

$$Q = \Delta U - A_{вн}.$$

Отсюда

$$\Delta U = Q + A_{вн},$$

$$\Delta U = 2,7 \text{ Дж.}$$

Ответ: $\Delta U = 2,7 \text{ Дж.}$

Полученное при решении задачи выражение

$$\Delta U = Q + A_{вн}$$

позволяет дать иную словесную формулировку первого закона термодинамики.

Изменение внутренней энергии термодинамической системы равно сумме количества теплоты, полученного системой, и работы внешних сил, действующих на систему.

В этой формулировке закона подчёркнут тот факт, что внутренняя энергия термодинамической системы, взаимодействующей с другими телами, может меняться за счёт двух процессов – теплообмена и совершения работы внешними силами.

● **Задача 2.** Длинная теплоизолированная труба, наглухо закрытая с одной стороны, закреплена горизонтально. Внутри трубы может без трения двигаться герметичный поршень массой 2,0 кг. Между закрытым концом трубы и поршнем введён гелий. Первоначально гелий заполняет объём 1,0 л, имеет температуру 200 К, его давление 1000 кПа. После того как поршень отпустили, газ расширился и его температура понизилась. С какой скоростью двигался поршень в тот момент, когда температура гелия составляла 80 К?

Решение:

Так как теплообмен отсутствует, то газ расширяется адиабатически ($Q = 0$).

Из первого закона термодинамики

$$Q = \Delta U + A_{газ}$$

следует, что в этом случае

$$A_{газ} = -\Delta U,$$

$$A_{газ} = -(U - U_0),$$

$$A_{газ} = U_0 - U. \quad (12.2)$$

За счёт работы силы давления газа поршень приобретает кинетическую энергию E_k :

$$E_k = \frac{m_n v^2}{2}, \quad (12.3)$$

$$A_{газ} = E_k. \quad (12.4)$$

(Здесь учтено, что начальная кинетическая энергия поршня равна нулю: $E_{k0} = 0$.)

Внутреннюю энергию гелия можно определить исходя из формулы (11.5):

$$U = \frac{3}{2} \nu RT. \quad (12.5)$$

Тогда соотношения (12.2) – (12.5) позволяют получить формулу для расчёта скорости поршня:

$$v = \sqrt{\frac{3\nu R (T_0 - T)}{m_n}}. \quad (12.6)$$

Количество вещества ν определим исходя из уравнения состояния идеального газа (5.1):

$$p_0 V_0 = \frac{m}{M} RT_0.$$

$$\nu = \frac{m}{M},$$

следовательно,

$$\nu = \frac{p_0 V_0}{RT_0}.$$

Тогда соотношение (12.6) окончательно примет вид

$$v = \sqrt{\frac{3p_0V_0(T_0 - T)}{T_0 m_n}},$$

$$v = \sqrt{\frac{3 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 (200 \text{ К} - 80 \text{ К})}{200 \text{ К} \cdot 2,0 \text{ кг}}} = 30 \text{ м/с}.$$

Действия с единицами измерений:

$$\sqrt{\frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{К}}{\text{К} \cdot \text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ: $v = 30 \text{ м/с}$.

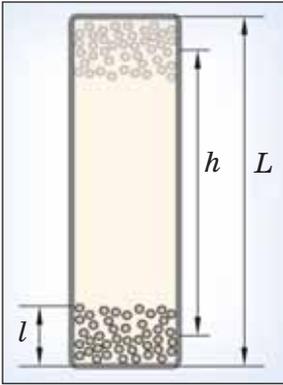


Рис. 53

Задача 3. Свинцовую дробь насыпают в картонный цилиндр длиной 60 см, так что высота столбика дроби 5,0 см (рис. 53). Измерив начальную температуру дроби, цилиндр закрывают, а затем вертикально расположенный картонный цилиндр резко поворачивают вокруг горизонтальной оси на 180° . Поднятая дробь падает. После того как цилиндр повернули 60 раз, вновь измерили температуру дроби и выяснили, что температура дроби увеличилась на $2,5^\circ\text{C}$. По результатам описанного опыта определите удельную теплоёмкость свинца.

Решение:

Удельная теплоёмкость характеризует тепловое свойство вещества в процессе его нагревания или охлаждения. Удельная теплоёмкость – это физическая величина, равная количеству теплоты, которое необходимо для изменения абсолютной температуры вещества массой 1 кг на 1 К.

Если при передаче телу массой m количества теплоты Q температура тела изменяется на ΔT , то удельная теплоёмкость C равна

$$C = \frac{Q}{m\Delta T}. \quad (12.7)$$



12.2. В каких единицах измеряется удельная теплоёмкость вещества?

Требуемое для нагревания тела количество теплоты определяется величиной изменения внутренней энергии тела и величиной совершаемой телом работы. В случае твёрдого тела совершаемая этим телом работа при его тепловом расширении, очевидно, незначительна. В этом случае формула первого закона термодинамики запишется в виде

$$Q = \Delta U. \quad (12.8)$$

Изменение внутренней энергии свинцовой дроби ΔU происходит за счёт её потенциальной энергии при поднятии на высоту h (рис. 53). Дробь падает, её потенциальная энергия превращается в кинетическую, а при ударе о дно цилиндра кинетическая энергия дроби переходит во внутреннюю энергию в процессе пластической деформации дробинки.



12.3. Как вычисляется потенциальная энергия тела массой m , взаимодействующего с Землёй, в случае поднятия тела на высоту h ?

Так как опыт длится недолго, теплоёмкость картонного цилиндра невелика, то можно считать, что потенциальная энергия поднятой дроби полностью идёт на увеличение её внутренней энергии.

$$\Delta U = Nmgh. \quad (12.9)$$

Высоту падения дроби h можно определить, зная длину цилиндра L и высоту столбика дроби l (рис. 53):

$$h = L - l. \quad (12.10)$$

Из соотношений (12.7) – (12.10) окончательно имеем

$$C = \frac{Ng(L - l)}{\Delta T},$$

$$C = \frac{60 \cdot 9,8 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot (0,60 \text{ м} - 0,050 \text{ м})}{2,5 \text{ К}} = 130 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Действия с единицами измерений:

$$\frac{\frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot \text{М}}{\text{К}} = \frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot \text{М}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{М}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Ответ: $C = 130 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$

Лабораторная работа «Определение удельной теплоты плавления льда».

Оборудование: термометр лабораторный, весы с разновесами, мензурка с водой, калориметр, куски льда (на столе учителя).

Указания к работе:



Задание 1. Определение удельной теплоты плавления льда.

1. Измерьте массу внутреннего алюминиевого стаканчика калориметра.
2. Налейте в алюминиевый стаканчик калориметра воду и определите её массу. Вставьте алюминиевый стаканчик с водой во внешний стаканчик калориметра и измерьте начальную температуру воды и алюминиевого стаканчика.

3. Возьмите кусок льда, осушите его салфеткой и опустите в воду.

4. Для ускорения теплообмена помещивайте воду термометром. Дождитесь, когда лёд расплавится, и измерьте конечную температуру воды и алюминиевого стаканчика.

5. Определите массу льда. Результаты запишите в таблицу:

Масса алюминиевого стаканчика $m_{ал}$, г	
Масса воды $m_в$, г	
Начальная температура воды t_1 , °C	
Конечная температура воды t_2 , °C	
Масса льда $m_л$, г	

6. Проведите анализ тепловых процессов.



12.4. Как рассчитать количество теплоты Q_1 , отданное водой при охлаждении от температуры t_1 до температуры t_2 ?

$$Q_1 = m_в C_в (t_2 - t_1), \quad (12.11)$$

где $C_в$ – удельная теплоёмкость воды, $C_в = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$.



12.5. Как рассчитать количество теплоты Q_1 , отданное алюминиевым стаканчиком при охлаждении от температуры t_1 до температуры t_2 ?

$$Q_2 = m_{ал} C_{ал} (t_2 - t_1), \quad (12.12)$$

где $C_{ал}$ – удельная теплоёмкость алюминия, $C_{ал} = 900 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$.



12.6. Как рассчитать количество теплоты Q_3 , полученное льдом при плавлении?

$$Q_3 = \lambda m_л, \quad (12.13)$$

где λ – удельная теплота плавления льда.



12.7. Как рассчитать количество теплоты Q_4 , полученное водой, образовавшейся при плавлении льда, при её нагревании до температуры t_2 ?

$$Q_4 = m_л C_в (t_2 - 0). \quad (12.14)$$

Ввиду того, что калориметр, вода и лёд образуют замкнутую термодинамическую систему, соответствующее уравнение теплового баланса запишется в виде

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 0. \quad (12.15)$$

Используя соотношения (12.11) – (12.15), выведите формулу для расчёта удельной теплоты плавления льда и определите численное значение величины.



12.8. В каких единицах измеряется удельная теплота плавления кристаллического вещества?



Задание 2. Пусть в вашем распоряжении имеется мокрый снег. Определите процентное содержание воды в снеге. Удельную теплоту плавления льда считать известной.

12.1 ● Стекло́нная колба, заполненная воздухом, подсоединена к поршневому насосу. При действии силой на поршень насоса производят изотермическое сжатие воздуха, совершив работу 3,5 Дж. Какое количество теплоты было передано воздухом, находящимся в колбе, окружающей среде в процессе его сжатия?

12.2 ● Для определения удельной теплоты сгорания 0,2 г топлива распылили в камере сгорания в смеси с воздухом, количество которого достаточно для полного сгорания топлива. При подаче на свечу зажигания электрического напряжения топливо сгорело, и внутренняя энергия продуктов сгорания увеличилась на 8,6 кДж. Какое значение удельной теплоты сгорания топлива было определено в эксперименте?

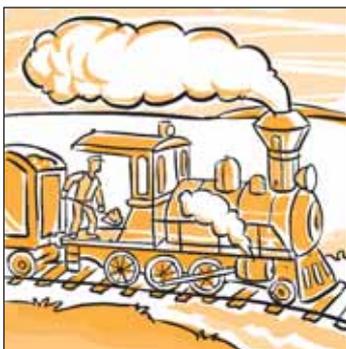
12.3 ● 8 г гелия перекачивают компрессором из большого резервуара с холодными стенками в меньший резервуар с более горячими стенками. При этом компрессором совершена работа 400 Дж, а стенками горячего резервуара передано газу количество теплоты 100 Дж. Какова температура газа после перекачки? Начальная температура газа 0 °С.



12.4. Одним из способов получения высоких температур является адиабатное сжатие газов. Для этого ударную трубу заполняют исследуемым газом и помещают в трубу заряд взрывчатого вещества. При взрыве ударная волна сжимает газ. Оцените, до какой температуры таким способом могут быть разогреты 2 моль аргона, если средняя мощность взрыва составляет 100 ГВт, а его продолжительность 5 мкс? Используя интернет-источники, выясните, какое максимальное значение температуры было достигнуто таким способом.

12.5 ● В каком из изопроцессов – изобарном или изохорном – удельная теплоёмкость газа больше? Ответ обосновать.

§ 13. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ



Одна из наиболее простых формулировок второго закона заключается в том, что тепло не может само по себе переходить от менее нагретых тел к более нагретым. Второй закон нельзя доказать. Это один из фундаментальных законов – утверждение, что что-то не может происходить.

Из книги «Необыкновенная физика обыкновенных явлений» Клиффорда Суорца

В этом параграфе обсуждается совершенно новый для вас вопрос.

Необратимость тепловых явлений. Первый закон термодинамики – закон сохранения энергии применительно к тепловым процессам. Этот закон строго «следит» за энергетическим балансом – общее количество джоулей должно быть неизменно.

Рассмотрим ситуацию: серебряную чайную ложку (пусть её масса 24 г) опустили в термос с горячей водой, и ложка нагрелась на $\Delta t = 20\text{ }^\circ\text{C}$. Какая энергия (количество теплоты Q) получена ложкой?

Так как удельная теплоёмкость серебра составляет $230 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{C}}$, то ответ ясен:

$$Q = mc\Delta t,$$

$$Q = 0,024 \text{ кг} \cdot 230 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{C}} \cdot 20\text{ }^\circ\text{C} = 110 \text{ Дж}.$$

На столько же джоулей уменьшится и энергия горячей воды.



13.1. Но может ли в этой ситуации ложка остыть на $20\text{ }^\circ\text{C}$, уменьшив свою энергию на 110 Дж, а горячая вода увеличить энергию на 110 Дж и повысить тем самым температуру?

Вы скажете: «Нет, это абсурд!» Но подобный абсурд не противоречит первому закону термодинамики – ведь энергетический баланс не будет нарушен.

Растворим в стакане с водой кристаллики поваренной соли – на это потребуется некоторая энергия, которую соль «почерпнёт» у воды, температура которой из-за этого понизится. Но обратный процесс, когда в солёной воде самопроизвольно восстановятся кристаллики соли, а вода при этом повысит свою температуру, не наблюдается. Откроем вентиль баллона, в котором под давлением находится газ, – газ выйдет из баллона. Но обратно в баллон газ «самостоятельно» не соберётся.

Подвесим стограммовый груз на нити, отведём груз в сторону от вертикали и предоставим возможность маятнику совершать колебания. Пусть первоначально механическая энергия маятника составляла, к примеру, 0,3 Дж. Вы знаете, что через некоторое время колебания прекратятся. Но закон сохранения энергии при этом не нарушен! 0,3 Дж энергии не исчезли бесследно – ровно на столько увеличилась энергия теплового движения молекул воздуха, окружающего маятник. Не могут ли молекулы воздуха все вместе «поделиться» энергией и передать 0,3 Дж маятнику так, чтобы он вновь отклонился от вертикали? Как мы знаем, такого не наблюдается.

Растаявшее мороженое само по себе вновь не замёрзнет; чернила, растворённые в воде, сами по себе вновь не соберутся в каплю на поверхности воды; чашка, упавшая со стола и разлетевшаяся при ударе на мелкие осколки, сама по себе вновь не окажется на столе в целости и сохранности. Эти явления не произойдут, хотя ни одно из них не противоречит первому закону термодинамики – закону сохранения энергии.

Как мы видим, тепловые процессы – это «улица с односторонним движением». **Все макроскопические процессы необратимы – они протекают только в одном направлении.** В обратном направлении необратимый процесс может быть реализован лишь в качестве одного из элементов более сложного процесса (растаявшее мороженое вновь можно заморозить, но это будет не самопроизвольный процесс – мороженое нужно будет поместить в холодильную установку).

Каково же направление процессов, протекающих в термодинамической системе? *Все процессы направлены к установлению равновесного состояния:*

- при передаче энергии от горячего тела к холодному выравниваются их температуры;
- при выходе газа из баллона происходит перемешивание молекул газа и молекул воздуха так, что в итоге устанавливаются одинаковые концентрации газа и воздуха в системе;
- после растворения кристалликов соли в воде устанавливаются одинаковая температура и концентрация соли в растворе и так далее.

Второй закон термодинамики. В 1850 году немецкий физик Рудольф Юлиус Эмануэль Клаузиус обобщил результаты изучения термодинамических процессов **во втором законе термодинамики**, дав ему следующую формулировку:

Теплота не может переходить сама собой от более холодного тела к более тёплому.

При рассмотрении второго закона (второго начала) термодинамики естественно возникает вопрос – почему же все возможные изменения, протекающие в термодинамической системе, приводят её именно к равновесному состоянию? Почему в соответствии со вторым законом термодинамики невозможен процесс, в котором бы самопроизвольно (без компенсации) энергия переходила бы от более холодных тел к более горячим, «отодвигая» систему от равновесного состояния?

Проиллюстрируем ответы на эти вопросы следующим примером, основанным на простейшей системе – идеальном газе.

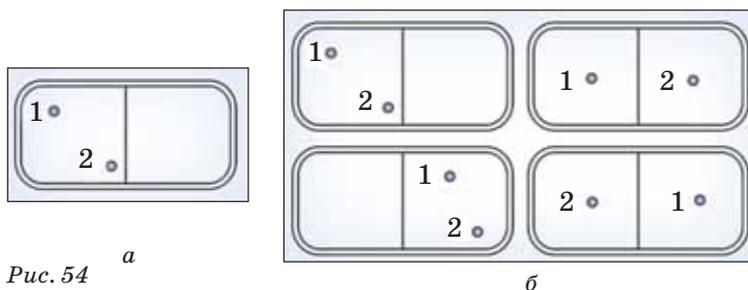


Рис. 54 а

б

Вообразим, что идеальный газ состоит из двух молекул, которые находятся в левой половине баллона, перегородженного заслонкой, а правая часть баллона пуста (рис. 54, а). Уберём заслонку. Молекулы могут расположиться в баллоне четырьмя различными способами (рис. 54, б). В одном случае молекулы могут вновь собраться в левой половине баллона. В двух случаях молекулы газа равномерно распределены по баллону – наступило равновесное состояние.

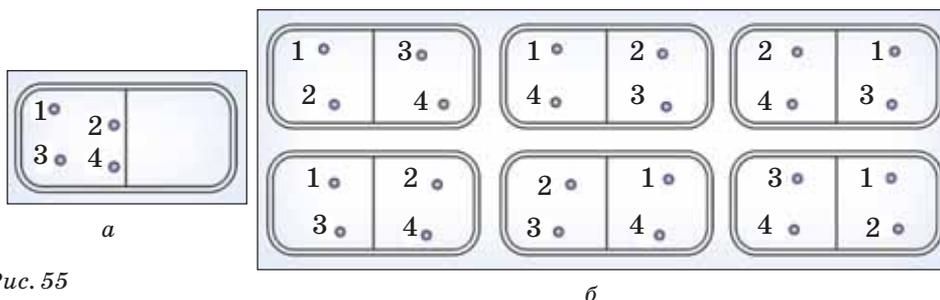


Рис. 55 а

б

Пусть газ состоит из четырёх молекул. После расширения только в одном случае газ может «самопроизвольно сжаться», собравшись в левой части баллона (рис. 55, а). В шести случаях молекулы газа равномерно распределены по баллону, образуя равновесное состояние (рис. 55, б).

Если сравнивать состояние «самопроизвольного сжатия газа» и «состояние теплового равновесия», то, как говорят математики, состояние равновесия более вероятно – оно реализуется большим числом способов.

В реальной макроскопической системе число молекул сопоставимо с числом молекул в одном моле – постоянной Авогадро.

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}.$$

Каждая из молекул может быть или в левой, или в правой части баллона – всего два способа. Общее же число способов распределения молекул газа в одном моле газа равно $(2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \dots 2) = 2^{6 \cdot 10^{23}}$ – это гигантское число! И лишь только в одном случае молекулы могут самопроизвольно собраться в левой части баллона, тогда как состояние равновесия реализуется множеством способов.

Теперь становится ясен глубинный физический смысл второго закона термодинамики! *Термодинамическая система приходит в состояние равновесия потому, что именно это состояние наиболее вероятно*, именно оно реализуется подавляющим числом способов. Тогда как неравновесное состояние имеет исчезающе малую вероятность и по этой причине (хотя оно и возможно) практически не реализуется в природе.

Рассмотрим ещё один пример. Допустим, с понедельника вы решили начать «новую жизнь», одним из условий которой является строгий порядок в расположении всех предметов на вашем рабочем столе – правильные стопки учебников и тетрадей, ручки и карандаши в строго определённом месте на столе. Через некоторое время вы замечаете, что «кристаллический» порядок расположения учебников и тетрадей вами нарушен, ручки и карандаши «растворились» по поверхности стола. Наступает состояние «теплового равновесия» – полный хаос в системе. Самопроизвольно, как прекрасно известно, порядок на письменном столе не восстановится – необходимо приложить дополнительные усилия.

Этот пример иллюстрирует тот факт, что состояние теплового равновесия – состояние наибольшего хаоса в микроскопической системе. Следовательно, второй закон термодинамики утверждает, что изменения, самопроизвольно происходящие в макроскопической системе, приводят к увеличению беспорядка в системе¹.

¹ В физике имеется величина, которая является количественной мерой беспорядка в макроскопических системах. Она называется энтропией. Второй закон термодинамики, сформулированный в терминах энтропии, утверждает, что энтропия замкнутой термодинамической системы с течением времени не может уменьшаться – она увеличивается либо остаётся неизменной.



Рис. 56

Тепловые двигатели. Тепловые двигатели – это устройства, которыми периодически совершается механическая работа за счёт внутренней энергии топлива. Принципиальная схема теплового двигателя изображена на рисунке 56. Основные обязательные элементы теплового двигателя – это нагреватель, рабочее тело и холодильник. Тепловым двигателем (его рабочим телом) совершается механическая работа в процессе передачи энергии от нагревателя к холодильнику.

В соответствии со вторым законом термодинамики такой процесс возможен лишь при условии, что температура нагревателя T_1 больше температуры холодильника T_2 :

$$T_1 > T_2.$$

При передаче нагревателем рабочему телу энергии (количества теплоты) Q_1 часть полученной энергии пойдёт на совершение двигателем механической работы A , часть будет обязательно передана холодильнику – Q_2 . В соответствии с первым законом термодинамики

$$Q_1 = A + Q_2. \quad (13.1)$$

Можно ли энергию, переданную холодильнику Q_2 , вновь вернуть в нагреватель и использовать её для совершения работы тепловым двигателем? Нет! Это запрещает второй закон термодинамики.

Можно ли обойтись без холодильника и передачи в холодильник количества теплоты Q_2 ? Нет! Если отсутствует холодильник и температуры во всех частях теплового двигателя равны, то наступило тепловое равновесие и работа совершаться не будет.

Рассмотрим следующий опыт. Длинную вертикально расположенную колбу заполним горячей водой и опустим в воду кусочки льда. В результате в нашем распоряжении будет столб воды, горячей в нижней своей части и холодной в верхней части.

Опустим в воду «картезианского водолаза» (рис. 57, а). Напомним, что «картезианским водолазом» называют неболь-

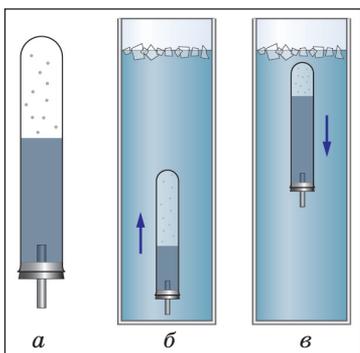


Рис. 57

шую пробирку, закрытую пробкой, через которую пропущена стеклянная трубка. «Водолаз» частично наполнен водой до такой степени, чтобы он мог погружаться в воду.

«Водолаз» опускается на дно колбы. В горячей воде воздух, находящийся в пробирке-«водолазе», нагревается, его давление возрастает, и часть воды вытесняется из «водолаза». Сила тяжести, действующая на «водолаза», уменьшается, и он всплывает под действием архимедовой силы (рис. 57, б). В процессе всплытия «водолаза» совершается определённая механическая работа (по поднятию воды, находящейся в пробирке).

В верхних, более холодных, слоях воды (там, где плавают кусочки льда) воздух в «водолазе» охлаждается, давление воздуха в «водолазе» уменьшается. Вода наполняет пробирку, и «водолаз» вновь погружается (рис. 57, в). В этом опыте «водолаз» и колба с «горяче-холодной» водой являются моделью теплового двигателя. Двигатель будет совершать работу («водолаз» «возит» воду снизу вверх) до тех пор, пока температура «нагревателя» (нижних горячих слоёв воды) больше температуры «холодильника» (верхних слоёв воды).

Работа, совершаемая тепловым двигателем, таким образом, составляет только некоторую часть от количества теплоты, передаваемого нагревателем.

Из соотношения (13.1) видно, что

$$A = Q_1 - Q_2. \quad (13.2)$$

Как вам известно, физическая величина, характеризующая эффективность двигателя с точки зрения превращения внутренней энергии топлива в механическую работу, – это коэффициент полезного действия (КПД).

КПД теплового двигателя равен отношению механической работы, совершённой двигателем, к количеству теплоты, полученному двигателем от нагревателя, выраженному в процентах.

или с учётом (13.2)

$$\text{КПД} = \frac{A}{Q_1} \cdot 100 \%, \quad (13.3)$$

$$\text{КПД} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100 \%. \quad (13.4)$$

Из второго закона термодинамики следует, что энергия, передаваемая рабочим телом холодильнику, – количество теплоты Q_2 – более не может быть использована, а поэтому она теряет для нас практическую ценность. **Невозможен тепловой двигатель, КПД которого был бы равен 100 %.**

В этой связи возникает крайне важный с практической точки зрения вопрос: «Если КПД теплового двигателя не может быть в принципе равен 100 %, какое же максимальное значение КПД физически возможно?» Ответ на этот вопрос был получен французским физиком и инженером, одним из основателей термодинамики Никола́ Леонаром Сади Карно (1796–1832). Карно, теоретически проанализировав процессы, происходящие в идеальном тепловом двигателе, установил, что *максимально возможная работа за один цикл определяется только разностью температур нагревателя и холодильника.*

Было установлено, что максимально возможный коэффициент полезного действия теплового двигателя, в котором использован нагреватель с абсолютной температурой T_1 и холодильник с абсолютной температурой T_2 , равен

$$\text{КПД}_{\text{макс}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100 \%. \quad (13.5)$$

Преобразуем последнее выражение:

$$\text{КПД}_{\text{макс}} = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \cdot 100 \%.$$

Из этой формулы видно, что для повышения КПД теплового двигателя необходимо увеличить температуру нагревателя и уменьшить температуру холодильника. Так как в роли холодильника чаще всего выступает окружающая среда, то практически повысить КПД теплового двигателя можно, повысив температуру нагревателя. Так, например, температура пара в мощных паровых турбинах достигает 540–560 °С. При таких параметрах пара и температуре холодильника 30 °С расчёт максимально возможного КПД по формуле (13.5) даёт результат 63–64 %. На практике КПД реальной паровой турбины существенно меньше и составляет около 40 %.

Примеры решения задач.

● **Задача 1.** Температура нагревателя идеальной тепловой машины $t_1 = 327$ °С, а температура холодильника $t_2 = 27$ °С. Количество теплоты, поступающее в холодильник за 1 мин, равно $Q_2 = 50$ кДж. Определите мощность машины.

Решение:

Мощность N – величина, которая характеризует быстроту совершения работы машиной или механизмом.

$$N = \frac{A}{t}.$$

Работу A , совершаемую тепловой машиной, можно определить, используя формулы (13.3) и (13.5) для расчёта соответственно КПД и максимально возможного КПД тепловой машины:

$$\begin{aligned}\text{КПД} &= \frac{A}{Q_1} \cdot 100 \%, \\ \text{КПД}_{\text{макс}} &= \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100 \%,\end{aligned}$$

где Q_1 – количество теплоты, полученное рабочим телом тепловой машины,

$$Q_1 = A + Q_2.$$

По условию задачи тепловая машина является идеальной, то есть

$$\text{КПД} = \text{КПД}_{\text{макс}}.$$

(Дальнейшие действия по решению задачи выполните самостоятельно.)

Ответ: $N = 5$ кВт.

● **Задача 2.** Оцените, какую механическую работу A можно совершить, имея айсберг объёмом $V = 1 \text{ км}^3$ в качестве холодильника и океан в качестве нагревателя. Температуру океана считать равной $t_1 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Решение:

Если айсберг использовать в качестве холодильника теплового двигателя, то рабочее тело будет постоянно передавать холодильнику энергию, что приведёт к таянию айсберга. После таяния айсберга температуры нагревателя и холодильника выравняются¹, и тепловой двигатель прекратит действовать.

Количество теплоты Q_2 , необходимое для плавления льда, определяется массой льда m , равной

$$m = \rho V,$$

где ρ – плотность льда, $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$,

и удельной теплотой плавления льда $\lambda = 330 \text{ кДж/кг}$.

$$Q_2 = \lambda m,$$

или

$$Q_2 = \lambda \rho V. \quad (13.6)$$

КПД теплового двигателя равен

$$\text{КПД} = \frac{A}{Q_1} \cdot 100 \%.$$



13.1. Как определить количество теплоты, полученное рабочим телом теплового двигателя, Q_1 ?

$$Q_1 = A + Q_2.$$

¹ Количество теплоты, необходимое для нагревания воды, полученной при плавлении айсберга, не учитывается.

Тогда

$$\text{КПД} = \frac{A}{A + Q_2} \cdot 100\%,$$

или с учётом соотношения (13.6)

$$\text{КПД} = \frac{A}{A + \lambda p V} \cdot 100\%.$$

Для оценки величины механической работы примем, что КПД данного гипотетического двигателя является максимально возможным.

$$\text{КПД} = \text{КПД}_{\text{макс}}.$$

Таким образом,

$$\frac{A}{A + \lambda p V} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Отсюда

$$A = \frac{\lambda p V (T_1 - T_2)}{T_2},$$

$$A = \frac{3,3 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 9 \cdot 10^2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 10^9 \text{ м}^3 (278 \text{ К} - 273 \text{ К})}{273 \text{ К}} = 5 \cdot 10^{15} \text{ Дж}.$$

Ответ: $A = 5 \cdot 10^{15}$ Дж. (Крупнейшей электростанции необходимо около 10 суток для выработки такого количества электроэнергии.)

Необратимость тепловых процессов, второй закон термодинамики, состояние теплового равновесия как наиболее вероятное термодинамическое состояние, **тепловой двигатель, принципиальная схема теплового двигателя, КПД теплового двигателя, КПД = $\frac{A}{Q_1} \cdot 100\%$, максимально возможный КПД теплового двигателя, $\text{КПД}_{\text{макс}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%$.**

13.1 ● В паровой машине от нагревателя каждую секунду поступает количество теплоты 100 кДж, и за такое же время двигатель отдаёт холодильнику 95 кДж. Каков КПД паровой машины? Какова её мощность?

13.2 ● Абсолютная температура холодильника идеального теплового двигателя 300 К. Какова должна быть абсолютная температура нагревателя, чтобы КПД двигателя составлял 70 %?

13.3 ● Подготовьте сообщение по теме «Экологические проблемы, обусловленные использованием тепловых двигателей».

13.4 ● Определите КПД дизельного двигателя автомобиля КамАЗ-5320, у которого удельный расход топлива 220 г/(кВт·ч). Удельная теплота сгорания дизельного топлива 43 МДж/кг.



13.5. В холодильнике некоторое количество теплоты от холодного тела, находящегося в морозилке, передаётся тёплому воздуху в комнате. Не нарушается ли при этом второй закон термодинамики? Ответ обосновать. Подготовьте сообщение по теме «Физические принципы действия холодильника».

Самое важное в разделе «Молекулярная физика»

1. Все тела состоят из частиц, которые движутся и взаимодействуют между собой.

Число частиц огромно.

Постоянная Авогадро:

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}.$$

2. Чем больше энергия теплового движения, тем выше температура тела.

Для идеального газа

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT.$$

Постоянная Больцмана:

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Существует наименьшая температура – абсолютный нуль температуры.

Давление, производимое идеальным газом, зависит от его концентрации и средней энергии поступательного движения молекулы газа.

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}.$$

3. Связь между макропараметрами задаётся уравнением состояния вещества.

Для идеального газа

$$pV = \frac{m}{M} RT.$$

Газовая постоянная:

$$R = N_A \cdot k, R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

4. Для реальных газов за счёт межмолекулярного взаимодействия возможна их конденсация и образование жидкости при температуре ниже критической.

Влажность воздуха – содержание водяных паров в воздухе – измеряют психрометром.

5. Твёрдые тела – это кристаллы, аморфные тела и полимеры. Дефекты кристаллической решётки определяют свойства кристаллов. При деформации твёрдых тел возникает сила упругости. Если механическое напряжение превосходит предел прочности, то происходит разрушение образца.

$$\sigma = \frac{|F_{\text{упр}}|}{S}.$$

6. Внутренняя энергия U – энергия движения и взаимодействия частиц макроскопического тела.

Для идеального одноатомного газа

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT.$$

Первый закон термодинамики – закон сохранения энергии для тепловых явлений.

$$\Delta U = Q + A_{\text{вн}}.$$

Процесс в теплоизолированной системе – адиабатный процесс.

7. Тепловые процессы необратимы.

Выполняется второй закон термодинамики.

КПД тепловых двигателей всегда меньше 100 %.

$$\text{КПД} = \frac{A}{Q_1} \cdot 100 \%,$$

$$\text{КПД}_{\text{макс}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100 \%.$$

1.1 ● Человек на 80 % состоит из воды. Оцените, какое количество молекул воды содержится в вашем организме.



1.2. Оцените, сколько (по массе) спирта необходимо сжечь, чтобы получить столько же тепловой энергии, сколько её содержится в пирожном безе. Необходимые справочные данные (удельная теплота сгорания топлива, калорийность продуктов питания, перевод единиц энергии из калорий в джоули) установите самостоятельно.

1.3 ● Подготовьте сообщение по теме «Изменение климата в современную эпоху – миф или реальность?»

1.4 ● Зависимость давления от температуры для некоторой массы идеального газа приведена на рисунке 58. В какой точке кругового процесса объём газа минимален?

1.5 ● Один моль идеального газа увеличивает давление и объём в 2 раза: от P_0 до $2P_0$ и от V_0 до $2V_0$ соответственно. График зависимости давления газа от его объёма при данном расширении газа приведён на рисунке 59. Какое количество теплоты было получено газом при расширении?

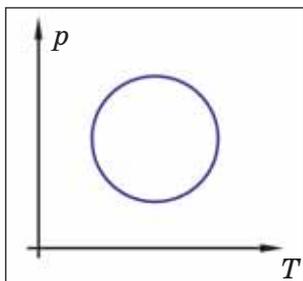


Рис. 58

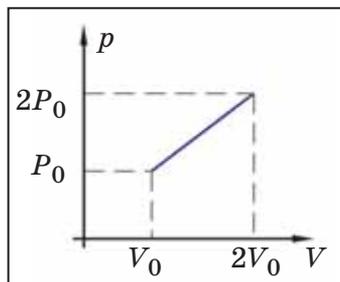


Рис. 59

P. S.



При изучении раздела «Молекулярная физика» вы увидели, как последовательно разворачивается формирование научной теории строения вещества на основе молекулярных представлений.

На основе простейшей модели «идеальный газ» было получено уравнение состояния, устанавливающее зависимость между давлением, объёмом и температурой для газов. Учёт межмолекулярного взаимодействия позволил объяснить основные свойства жидкостей. Анализ внутреннего строения твёрдых тел показал, как влияют дефекты на свойства кристаллов.

Рассмотрение энергетических превращений, происходящих в макроскопических телах, позволило помимо уже известного вам первого закона термодинамики (закона сохранения энергии) сформулировать второй закон термодинамики. Было введено понятие необратимости тепловых процессов.

Но, как гласит известная мудрость, «чем обширнее круг ваших знаний, тем больше и граница с неизведанным». Обозначим только некоторые из этих «граничных» вопросов:

1. Каково уравнение состояния для реальных газов? Как теоретически рассчитать значение критической температуры?

2. Каковы теоретические закономерности процесса диффузии в жидкостях?

3. Одна из бурно развивающихся отраслей современной физики – физика твёрдого тела. Как в промышленных условиях вести рост кристаллов? Как скорость звука в кристалле зависит от его строения? Как зависит теплоёмкость твёрдых тел от температуры? Как отличаются свойства вещества, находящегося в «тонкоплёночном» состоянии, от свойств этого же вещества в кристалле-массиве? Вот только некоторые из вопросов физики твёрдого тела.

4. Как рассчитывать внутреннюю энергию многоатомных газов, жидкостей и твёрдых тел?

5. Как протекает процесс распространения энергии в почве, земной коре и почему существует вечная мерзлота?

6. Как зависит давление газа от объёма при адиабатном процессе?

7. Нами изучено два закона (начала) термодинамики. Существует ли третий закон термодинамики?

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

В этом разделе, изучая электрические явления, вы в первую очередь не расширите свои знания (такие понятия, как электрическое поле, электрический ток, вам уже известны), а углубите их.

Вы изучите основные характеристики электрического поля, закон Ома для полной электрической цепи. Узнаете, как, применяя знания из области молекулярной физики, можно определить заряд электрона при анализе результатов процесса электролиза.



Вспомните, что вам известно об основных свойствах электрического поля, что такое электрический ток и как формулируется закон Ома для участка цепи. Какие заряженные частицы являются носителями заряда при прохождении тока в металлах, газах, электролитах, полупроводниках и как осуществляется ток через вакуум?

§ 14. Электрическое поле

Силы в атоме

Электрические силы. Электрическое поле

Характеристики электрического поля

Графическое изображение электрического поля

Связь между напряжённостью и потенциалом для случая однородного поля

§ 15. Решение задач по теме «Характеристики электрического поля»

§ 16. Закон Кулона

Закон Кулона

Напряжённость и потенциал поля точечного заряда

Лабораторная работа «Определение кулоновской силы»

§ 17. Конденсаторы

Конденсатор – накопитель заряда и энергии

Энергия электрического поля

Применение конденсаторов

Соединение конденсаторов

§ 18. Постоянный электрический ток

Электрический ток. Сила тока

Закон Ома для участка цепи

Последовательное и параллельное соединение проводников

Работа и мощность тока

§ 19. Электрическое сопротивление

Удельное сопротивление

Сопротивление проводника

Лабораторная работа «Определение длины и диаметра медной проволоки»

§ 20. Закон Ома для полной цепи

Электродвижущая сила (ЭДС)

Закон Ома для полной цепи

Лабораторная работа

«Проверка закона Ома для полной цепи»

§ 21. Лабораторная работа «Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока»

Примеры решения задач

Лабораторная работа

«Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока»

§ 22. Ток через вакуум

Термоэлектронная эмиссия

Электровакuumные приборы

§ 23. Ток в металлах

Природа тока в металлах

Вывод закона Ома для участка цепи

Зависимость удельного сопротивления металлов от температуры

Лабораторная работа

«Снятие вольт-амперной характеристики лампы накаливания»

§ 24. Ток в газах

Газовый разряд

Виды самостоятельного газового разряда

§ 25. Ток в электролитах

Электролитическая диссоциация

Электролиз

Лабораторная работа

«Определение заряда электрона»

§ 26. Полупроводники

Особые свойства полупроводников

Элементы зонной теории

Роль примеси в полупроводниках

§ 27. *p-n*-Переход*p-n*-Переход

Полупроводниковый диод

Практическая работа «Изучение полупроводникового диода»

Фотоэлемент

Транзистор

Самое важное в разделе «Электрические явления»

P. S.

§ 14. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ



Отыщи всему начало, и ты многое поймёшь.
Козьма Прутков – коллективный псевдоним писателей Алексея Толстого и братьев Жемчужниковых, выступавших под этим именем с баснями, афоризмами с 1850 по 1860-е годы

Вам уже известно о существовании в природе электрического поля.



Силы в атоме. Проведём некоторый расчёт. Вычислим силу гравитационного взаимодействия F между ядром атома водорода и электроном атома.

Ядро атома водорода в простейшем случае – это частица протон, его масса

$$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Масса электрона

$$m_e = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ кг.}$$

Радиус атома водорода известен: $r = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$



14.1. Как рассчитывается сила всемирного тяготения?

$$F = G \frac{m_p m_e}{r^2},$$

где G – гравитационная постоянная, она равна

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}.$$

$$F = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2} \cdot 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}{(0,529 \cdot 10^{-10})^2 \text{ м}^2},$$

$$F = 4 \cdot 10^{-47} \text{ Н.}$$

Представим, что атомарный водород находится в баллоне при комнатной температуре ($T = 293 \text{ К}$). Тогда средняя кинетическая энергия поступательного движения атома составляет

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT,$$

где k – постоянная Больцмана.

$$\bar{E} = \frac{3}{2} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 293 \text{ К},$$

$$\bar{E} = 6,07 \cdot 10^{-21} \text{ Дж.}$$

При столкновении атома со стенкой баллона сила, возникающая при взаимодействии атома со стенкой, должна совершить работу, «остановив» атом и уменьшив кинетическую энергию до нуля. В самом грубом приближении посчитаем эту работу как работу постоянной силы взаимодействия $F_{\text{вз}}$, совершённой при перемещении, равном радиусу атома.

$$-F_{\text{вз}} \cdot r = 0 - \bar{E}.$$

(Здесь учтено, что сила взаимодействия и перемещение направлены противоположно и конечная кинетическая энергия атома при «налёте» на стенку баллона равна нулю.)

Тогда

$$F_{\text{вз}} = \frac{\bar{E}}{r},$$

$$F_{\text{вз}} = \frac{6,07 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}}{0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}},$$

$$F_{\text{вз}} \approx 1 \cdot 10^{-10} \text{ Н.}$$

При ударе атома о стенку баллона с электроном, находящимся в атоме, образно говоря, происходит то же самое, что с пассажиром в автомобиле при столкновении автомобиля с препятствием. Чтобы пассажир не вылетел из автомобиля, нужны ремни безопасности, благодаря которым возникает сила упругости и пассажир движется с тем же ускорением, что и автомобиль.

Электрон легче ядра в

$$\frac{1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг}}{9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ кг}} \approx 2000 \text{ раз.}$$

Следовательно, сила F_e , способная удержать электрон в атоме, может быть в 2000 раз меньше силы взаимодействия $F_{\text{вз}}$ при столкновении.

$$F_e = \frac{F_{\text{вз}}}{2000},$$

$$F_e = 5 \cdot 10^{-14} \text{ Н.}$$

Эта сила *во много раз больше* силы всемирного тяготения, действующей между ядром и электроном.

$$\frac{5 \cdot 10^{-14}}{4 \cdot 10^{-47}} \approx 10^{33}. \text{ (Огромное число!)}$$

Таким образом, сила всемирного тяготения не может быть тем «ремнём безопасности», который обеспечивает сохранность атома при его столкновениях со стенкой баллона (или другими атомами).

Мы неизбежно приходим к выводу, который для нас не является неожиданным: *между ядром атома и электронами, находящимися в электронной оболочке атома, действуют силы притяжения, которые во много раз больше силы гравитационного взаимодействия.*

Электрические силы. Электрическое поле. Известно, что частицы, составляющие атомы и молекулы вещества, подразделяются на электрически заряженные и нейтральные частицы. Электрически заряженные частицы участвуют в электрическом взаимодействии, которое существенно больше (в микромире – мире атомов и частиц), чем гравитационное. Электрически заряженные частицы имеют или положительный, или отрицательный заряд. Одноимённо заряженные частицы отталкиваются, разноимённо заряженные частицы притягиваются. Нейтральные частицы не участвуют в электрическом взаимодействии.

Физическая величина, характеризующая частицу по степени её участия в электромагнитном взаимодействии, называется электрическим зарядом. **Единица измерения электрического заряда – кулон¹** (сокращённо обозначается Кл). Так единица измерения названа в честь французского физика Шарля Огюстена Кулона (1736–1806), установившего закон взаимодействия неподвижных электрических зарядов.

Электрический заряд электрона равен $e = -1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Одна из особенностей электрического заряда заключается в том, что эта величина является *дискретной*² – заряд любой частицы кратен заряду электрона. Таким образом, заряд электрона является минимальным электрическим зарядом, существующим в природе³. Вторая существенная особенность электрического заряда – выполняется *закон сохранения заряда*.

Алгебраическая сумма электрических зарядов всех частиц замкнутой системы не меняется, какие бы процессы ни происходили в системе.

¹ Единица измерения заряда кулон не является основной единицей СИ, а выражается через единицу электрического тока – ампер и единицу времени – секунду.

² От латинского *discretus* – прерывистый, состоящий из отдельных частей.

³ По современным научным представлениям, в природе существуют частицы – кварки, заряд которых меньше заряда электрона, но в свободном состоянии они не обнаружены.

Обозначим величину электрического заряда буквой q , тогда математически закон сохранения электрического заряда можно записать следующим образом:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots = \text{const.}$$

Закон сохранения электрического заряда наряду с другими законами сохранения – законом сохранения энергии, законом сохранения импульса – является фундаментальным законом природы, отражающим определённые свойства пространства-времени.

Как вам известно, заряженные частицы взаимодействуют (притягиваются или отталкиваются) благодаря тому, что вокруг них существует *электрическое поле*. Впервые предположения о существовании особой формы материи – электрического поля – были высказаны великим английским физиком Майклом Фарадеем (1791–1867).

Основные свойства электрического поля таковы. *Электрическое поле всегда существует вокруг любой электрически заряженной частицы, и электрическое поле действует на заряженные частицы.*

На основе идеи Майкла Фарадея великим английским физиком Джеймсом Клерком Максвеллом (1831–1879) была разработана теория электромагнитного поля, объяснившая весь спектр электромагнитных явлений и получившая в дальнейшем полное экспериментальное подтверждение.

Характеристики электрического поля. Электрическое поле – особый вид материи, которая существует вокруг электрического заряда. В настоящее время этот научный факт не вызывает каких-либо сомнений. Наиболее простой формой электрического поля является поле, создаваемое неподвижными электрическими зарядами. Такое поле называют *электростатическим*¹.

Для количественного описания электрического поля используются определённые физические величины – характеристики поля. Одной из таких характеристик является **напряжённость электрического поля**. Обозначают напряжённость электрического поля как \vec{E} .



14.2. Каким образом можно определить, существует или нет в некоторой точке пространства электрическое поле?

Поместим в некоторую точку пространства заряженное тело малых размеров (*точечный заряд*). Если на точечный заряд будет действовать сила, направление которой зависит от знака заряда, а величина

¹ Далее мы будем рассматривать свойства электростатических полей, называя их, как и раньше, электрическими полями.

силы – от величины электрического заряда, то можно с уверенностью утверждать, что в данной точке пространства существует электрическое поле.

Можно ли в качестве характеристики электрического поля в некоторой точке пространства взять силу \vec{F} , действующую на заряд q , помещённый в эту точку пространства? Нет. Ведь если величина заряда будет иной ($2q$, $3q$, $-2q$, $-3q$), то и сила также изменится ($2\vec{F}$, $3\vec{F}$, $-2\vec{F}$, $-3\vec{F}$ и так далее). Отношение же силы \vec{F} к величине заряда q , очевидно, не будет зависеть от величины заряда¹ и может быть принято за характеристику поля.

Напряжённость электрического поля – это величина, равная отношению силы, действующей со стороны поля на электрический заряд, к величине заряда.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} . \quad (14.1)$$

Напряжённость электрического поля – векторная величина. Единица измерения напряжённости $\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ (читается: ньютон на кулон).



14.3. Почему напряжённость часто называют силовой характеристикой поля?

Если в некоторой точке пространства существует не одно, а несколько электрических полей, то на заряд q , помещённый в эту точку пространства, будет действовать не одна, а несколько сил F_1 , F_2 , F_3 и так далее.



14.4. Что называют равнодействующей силой?

Равнодействующая сила \vec{F} будет равна

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots$$

По определению напряжённости,

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} ,$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3}{q} ,$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_1}{q} + \frac{\vec{F}_2}{q} + \frac{\vec{F}_3}{q} + \dots ,$$

или

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$$

¹ Точечный заряд q должен быть таким, чтобы его присутствие не приводило к перераспределению тех зарядов, которые порождают исследуемое поле.

Таким образом, *напряжённость электрического поля \vec{E} , создаваемого несколькими зарядами, равна геометрической сумме напряжённостей электрических полей, создаваемых отдельными зарядами.*

Второй основной характеристикой электрического поля является величина, называемая **потенциал электрического поля**. Обозначают потенциал электрического поля буквой ϕ .

Если заряд q находится в электрическом поле, то он взаимодействует с полем, а значит, *обладает потенциальной энергией*. Обозначим потенциальную энергию взаимодействия электрического заряда и поля как W . Если величина заряда будет иной ($2q$, $3q$ и так далее), то и энергия взаимодействия также изменится ($2W$, $3W$ и так далее). Отношение же энергии взаимодействия W к величине заряда q , очевидно, не будет зависеть от величины заряда и может быть принято за характеристику поля.

Потенциал электрического поля – это величина, равная отношению потенциальной энергии взаимодействия заряда и поля к величине заряда.

$$\phi = \frac{W}{q}. \quad (14.2)$$

Потенциал электрического поля – это скалярная величина. Единица измерения потенциала – вольт (сокращённо В).

$$1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}.$$



14.5. Почему потенциал часто называют энергетической характеристикой поля?

При действии на заряженную частицу силы со стороны электрического поля частица может переместиться, и скорость её движения может измениться, а значит, может измениться и её кинетическая энергия E_k . Полная же энергия заряженной частицы, находящейся в электрическом поле, в соответствии с законом сохранения энергии есть величина постоянная:

$$E_k + W = E_{k0} + W_0, \quad (14.3)$$

где E_{k0} и E_k – соответственно начальная и конечная кинетическая энергия заряженной частицы;

W_0 и W – соответственно начальная и конечная потенциальная энергия взаимодействия заряда и поля.

Преобразуем выражение (14.3):

$$\begin{aligned} E_{\kappa} + W &= E_{\kappa 0} + W_0, \\ E_{\kappa} - E_{\kappa 0} &= W_0 - W. \end{aligned} \quad (14.4)$$

Левая часть равенства (14.4) – изменение кинетической энергии заряженной частицы. Правая часть равенства – разность потенциальных энергий взаимодействия заряда и поля.



14.6. Как определяется механическая работа силы, действующей на тело?

Механическая работа A силы, действующей на заряженную частицу со стороны электрического поля, равна изменению кинетической энергии, произошедшему под действием силы.

$$A = E_{\kappa} - E_{\kappa 0}.$$

Таким образом, левая часть равенства (14.4) равна работе. Следовательно,

$$A = W_0 - W.$$

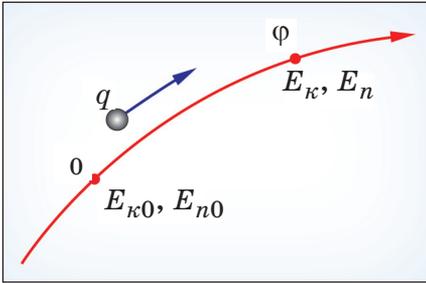


Рис. 60

Тогда

$$A = q\varphi_0 - q\varphi,$$

$$A = q(\varphi_0 - \varphi).$$

Разность потенциалов $\varphi_0 - \varphi$ называют электрическим напряжением (или просто напряжением). Обозначают напряжение буквой U .

Таким образом,

$$U = \varphi_0 - \varphi.$$

$$A = qU.$$

(14.5)

Работа, совершённая электрическим полем по перемещению заряженной частицы, определяется зарядом частицы q и разностью потенциалов U между начальной и конечной точками нахождения частицы.

Выразим начальную и конечную потенциальную энергии через потенциал поля в начальной точке нахождения частицы и потенциал поля в конечной точке нахождения частицы (рис. 60).

Из формулы (14.2), определяющей потенциал, следует, что

$$W_0 = q\varphi_0,$$

$$W = q\varphi.$$



14.7. В первом случае шар падает вертикально вниз, а во втором случае скатывается по наклонной плоскости (рис. 61). В каком случае силой тяжести совершается бóльшая работа?

Как вам известно, работа силы тяжести не зависит от формы траектории, по которой движется тело под действием силы тяжести. Работа определяется разностью потенциальных энергий в начальной и конечной точках нахождения тела. Таким же свойством обладает и электрическое поле. *Работа электрического поля*

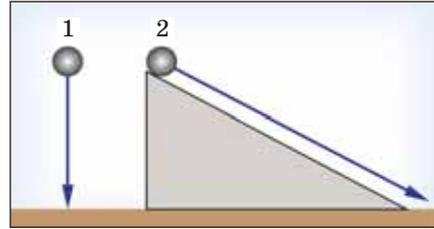


Рис. 61

по перемещению заряженной частицы (заряда) не зависит от траектории частицы. Работа по замкнутой траектории, очевидно, равна нулю:

$$\varphi_0 = \varphi,$$

$$U = 0,$$

следовательно,

$$A = 0.$$

Поле, обладающее подобными свойствами, называют потенциальным. **Электрическое поле является потенциальным.**

Графическое изображение электрического поля. Человек обладает различными каналами получения информации – у него есть зрение, слух, обоняние, осязание, имеется возможность испытывать различные вкусовые ощущения. Но ни один орган чувств человека непосредственно не реагирует на электрическое поле. По этой причине, чтобы наглядно представить электрическое поле, используются *условные графические образы* – силовые линии и эквипотенциальные поверхности.

Силовые линии электрического поля – это линии, касательные к которым в каждой точке пространства совпадают по направлению с напряжённостью электрического поля. На рисунке 62, а, б изображены в качестве примера силовые линии электрического поля,

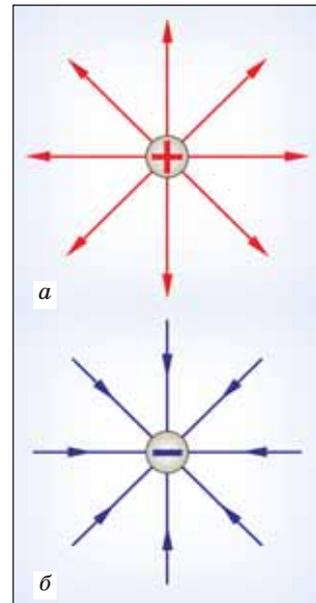


Рис. 62

создаваемого точечными положительным и отрицательным зарядами. По направлению силовой линии можно судить о направлении напряжённости, а густота проведённых на рисунке силовых линий «сигнализирует» о величине напряжённости. Так, на рисунке 62, а, б видно, что чем дальше от источника поля – заряда, тем меньше густота силовых линий. Действительно, чем дальше от заряда, тем силовое воздействие поля меньше – меньше напряжённость.

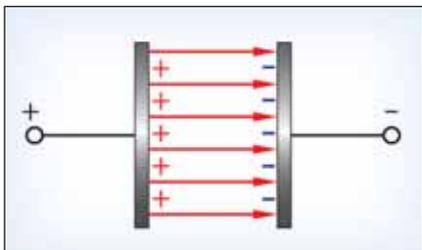


Рис. 63

одинакова). Однородное электрическое поле существует между двумя разноимённо заряженными пластинами конденсатора (рис. 63).

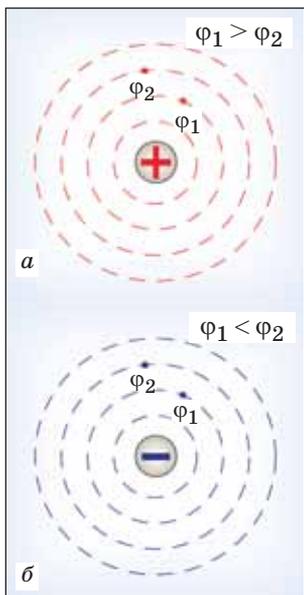


Рис. 64

Практически важным является случай электрического поля, напряжённость которого в каждой точке одинакова. Такое поле называют *однородным*. Силовые линии однородного поля параллельны друг другу (напряжённость – векторная величина, направления векторов напряжённости одинаковы), и густота силовых линий неизменна (величина напряжённости

Эквипотенциальные поверхности – поверхности, все точки которой имеют один и тот же потенциал. На рисунке 64, а, б изображены эквипотенциальные поверхности для случая точечных положительных и отрицательных зарядов. На рисунке 65 показаны эквипотенциальные поверхности однородного поля.

Как расположены относительно друг друга силовые линии и эквипотенциальные поверхности? *Линии напряжённости электрического поля перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.*

Докажем это утверждение. Пусть заряженную частицу переместили на малое расстояние S из точки с потенциалом φ_0 в точку с потенциалом φ (рис. 66). Если частица перемещалась по эквипотенциальной поверхности, то работа электрического поля

$$A = qU, U = \varphi_0 - \varphi$$

равна нулю:

$$A = 0.$$

С другой стороны, работа постоянной силы (а при малом перемещении \vec{S} можно считать силу неизменной) рассчитывается по формуле

$$A = |\vec{F}| \cdot |\vec{S}| \cdot \cos \alpha, \quad (14.6)$$

где α – угол между вектором силы и вектором перемещения.

Из формулы (14.1), определяющей напряжённость \vec{E} электрического поля, имеем

$$|\vec{F}| = |\vec{E}| \cdot |q|.$$

Тогда

$$A = |\vec{E}| \cdot |q| \cdot |\vec{S}| \cdot \cos \alpha.$$

Так как работа электрического поля в рассматриваемом случае равна нулю, а модули напряжённости, перемещения и заряда отличны от нуля, то

$$\cos \alpha = 0,$$

$$\alpha = 90^\circ.$$

Что и требовалось доказать.

Если положительно заряженная частица под действием электрического поля будет двигаться по направлению силовой линии, то полем, очевидно, будет совершаться положительная работа. Следовательно, частица будет смещаться из точки с более высоким потенциалом в точку с меньшим значением потенциала. *Силовые линии направлены в сторону убывания потенциала.*



Связь между напряжённостью и потенциалом. Напряжённость электрического поля и потенциал – две стороны одной «медали», две физические величины, характеризующие один и тот же материальный объект – электрическое поле.

Для установления связи между этими двумя характеристиками рассмотрим перемещение заряженной частицы в электрическом поле

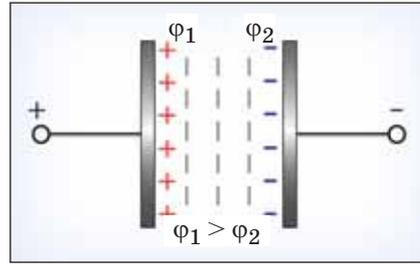


Рис. 65

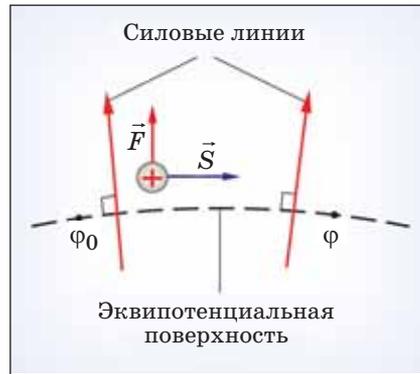


Рис. 66

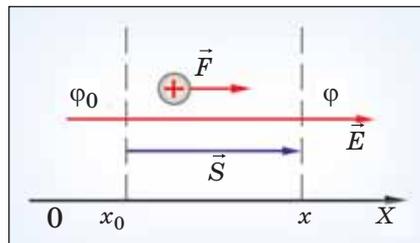


Рис. 67

из точки с потенциалом φ_0 в точку с потенциалом φ вдоль силовой линии (рис. 67).

Если напряжённость электрического поля равна \vec{E} , то оно будет действовать на частицу силой \vec{F} , равной

$$\vec{F} = \vec{E}q.$$

Пусть под действием этой силы частица совершит столь *малое перемещение* вдоль силовой линии, что напряжённость поля можно считать неизменной (и поэтому силу, действующую на частицу, – постоянной).

Направим ось OX вдоль силовой линии. В этом случае проекции силы и перемещения на ось OX будут положительными и равны соответственно

$$|\vec{F}| = F_x,$$

$$|\vec{S}| = S_x.$$

Вычислим проекции силы и перемещения:

$$F_x = E_x q, \quad (14.7)$$

$$S_x = x - x_0,$$

или

$$S_x = \Delta x. \quad (14.8)$$

Применим формулу (14.6) для расчёта работы постоянной силы. Угол между силой \vec{F} и перемещением частицы \vec{S} равен нулю (рис. 67). Тогда с учётом (14.7) и (14.8) работа силы, действующей на частицу со стороны электрического поля, будет равна

$$A = E_x q \Delta x. \quad (14.9)$$

С другой стороны, работа электрического поля при перемещении частицы из точки с потенциалом φ_0 в точку с потенциалом φ равна

$$A = q(\varphi_0 - \varphi).$$

Запишем эту формулу в ином виде:

$$A = -q(\varphi_0 - \varphi),$$

$$A = -q\Delta\varphi, \quad (14.10)$$

где $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0$ – изменение потенциала.

Из соотношений (14.9) и (14.10) имеем

$$E_x q \Delta x = -q\Delta\varphi,$$

$$E_x = - \frac{\Delta\varphi}{\Delta x}. \quad (14.11)$$

Связь между напряжённостью и потенциалом для случая однородного поля. Пусть положительно заряженная частица, имеющая заряд q , переместилась под действием постоянной силы со стороны однородного электрического поля на расстояние d . Тогда в соответствии с формулой (14.6) работа, совершённая электрическим полем, равна

$$A = Eqd, \quad (14.12)$$

где E – напряжённость однородного электрического поля.

С другой стороны, в соответствии с формулой (14.5)

$$A = qU,$$

где U – напряжение (разность потенциалов) между двумя точками однородного электрического поля, находящимися друг от друга на расстоянии d по силовой линии.

Тогда

$$Eqd = qU,$$

отсюда

$$E = \frac{U}{d}. \quad (14.13)$$

Установленная связь между напряжённостью и потенциалом показывает, что величина напряжённости электрического поля определяется изменением потенциала поля на единицу длины силовой линии. Из соотношения (14.11) также следует, что помимо единицы измерения напряжённости ньютон на кулон (Н/Кл) может быть использована единица измерения вольт на метр (В/м).

$$\frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

Электрическое поле, электрический заряд, кулон (Кл), $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, напряжённость электрического поля, $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$, Н/Кл, потенциал электрического поля, $\varphi = \frac{W}{q}$, вольт (В), разность потенциалов (напряжение), $U = \varphi_0 - \varphi$, $A = qU$, силовые линии и эквипотенциальные поверхности электрического поля, **связь напряжённости и потенциала, $E_x = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x}$, $E = \frac{U}{d}$ (для однородного поля).**

14.1 ● Пылинка, имеющая заряд 2 нКл, попадает в электрическое поле с напряжённостью 8 кВ/м. С какой силой электрическое поле действует на пылинку?

14.2 ● Электрон из точки с потенциалом -200 В переместился в точку с потенциалом 100 В. Чему равно напряжение между указанными точками? Какая работа была совершена электрическим полем по перемещению электрона?

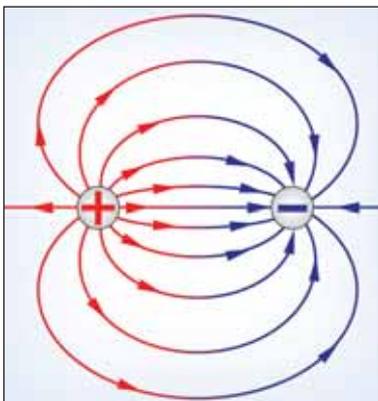


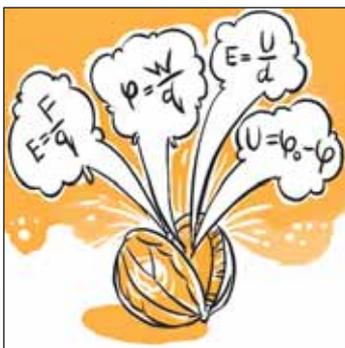
Рис. 68

14.3 ● Плоский воздушный конденсатор подключён к источнику напряжения 200 В. Чему равна напряжённость электрического поля между обкладками (пластинами) конденсатора, если расстояние между пластинами 0,4 см?

14.4 ● α -частица, излучённая радиоактивным изотопом, переместилась в электрическом поле напряжённостью 5 кВ/м на расстояние 2 см вдоль силовой линии. Какая разность потенциалов пройдена частицей? На сколько изменилась её кинетическая энергия?

14.5 ● На рисунке 68 изображена картина силовых линий электрического поля, создаваемого двумя неподвижными одинаковыми по величине, но противоположными по знаку зарядами – диполем. Изобразите эквипотенциальные поверхности электрического поля диполя.

§ 15. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ»



Кто хочет съесть ядро ореха, должен расколоть его скорлупу.

*Тит Макций Плавт
(сер. III в. до н. э. – ок. 184 до н. э.),
римский комедиограф*

Вам уже известны основные характеристики электрического поля – напряжённость и потенциал.

Среди основных типичных задач, связанных с применением характеристик электрического поля, можно выделить следующие:

- задачи на непосредственный расчёт одной из характеристик электрического поля,
- задачи, при решении которых используется формула, определяющая связь между напряжённостью и потенциалом,
- задачи на расчёт движения заряженной частицы в электрическом поле.

Задача 1. Протон влетает в некоторую точку пространства, в которой электрическое поле создано двумя зарядами. Напряжённости электрических полей зарядов в этой точке взаимно перпендикулярны и равны соответственно 300 и 400 В/м. Определите, с каким ускорением будет двигаться протон в данной точке. Масса протона $m = 1,67262 \cdot 10^{-27}$ кг, заряд протона $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Решение:

В соответствии со вторым законом Ньютона ускорение протона будет равно

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

где \vec{F} – сила, действующая на частицу со стороны электрического поля,

$$\vec{F} = \vec{E}q,$$

здесь \vec{E} – напряжённость электрического поля,

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2,$$

где \vec{E}_1 и \vec{E}_2 – напряжённость поля зарядов.

Тогда

$$\vec{a} = \frac{(\vec{E}_1 + \vec{E}_2)q}{m}.$$

Величина ускорения будет равна

$$|\vec{a}| = \frac{|\vec{E}_1 + \vec{E}_2|q}{m}. \quad (15.1)$$

По условию задачи векторы \vec{E}_1 и \vec{E}_2 взаимно перпендикулярны (рис. 69). Модуль суммы векторов $\vec{E}_1 + \vec{E}_2$ определим, воспользовавшись теоремой Пифагора:

$$|\vec{E}_1 + \vec{E}_2| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}.$$

Из соотношения (15.1) окончательно имеем

$$|\vec{a}| = \frac{\sqrt{E_1^2 + E_2^2} q}{m}.$$

(Дальнейшие действия по решению задачи выполните самостоятельно.)

Ответ: $|\vec{a}| = 4,8 \cdot 10^{10}$ м/с².

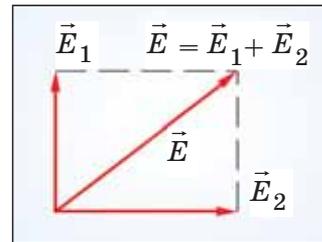


Рис. 69

● **Задача 2.** Металлический шар, обладающий положительным зарядом, осветили ультрафиолетовым светом. В результате происходит явление фотоэффекта – кванты светового излучения с поверхности металла вырывают электроны. Точки с каким потенциалом может достигнуть электрон, если его первоначальная кинетическая энергия составляет $1,5 \cdot 10^{-18}$ Дж? Потенциал поверхности шара 10 В. Заряд электрона $e = -1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл. Считать, что вблизи шара других заряженных тел нет.

Решение:

Так как вблизи шара других заряженных тел нет, то электрическое поле вокруг шара создаётся положительным зарядом шара. Электрон, «стартовав» с поверхности шара и удаляясь от него, взаимодействует с электрическим полем шара, и кинетическая энергия электрона в результате уменьшается до нуля.

$$E_{\kappa} = 0.$$

Затем электрон возвращается на поверхность шара.

Работа электрического поля, совершённая по торможению электрона, определяется разностью потенциалов, которую прошёл электрон:

$$A = e(\varphi_0 - \varphi). \quad (15.2)$$

С другой стороны, работа равна изменению кинетической энергии частицы.

$$A = E_{\kappa} - E_{\kappa 0}. \quad (15.3)$$

Из соотношений (15.2) и (15.3) имеем

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi_0 - \frac{E_{\kappa} - E_{\kappa 0}}{e}, \\ \varphi &= 10 \text{ В} - \frac{0 \text{ Дж} - 1,5 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}}{-1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}, \\ \varphi &= 0,6 \text{ В}. \end{aligned}$$

Действия с единицами измерений:

$$\text{В} - \frac{\text{Дж} - \text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В} - \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В} - \text{В} = \text{В}.$$

Ответ: $\varphi = 0,6 \text{ В}$.

● **Задача 3.** В электронно-лучевой трубке электроны ускоряются анодным напряжением $U = 4$ кВ. Сколько времени движется электрон от анода к экрану электронно-лучевой трубки, если расстояние между анодом и экраном $S = 25$ см? Начальную кинетическую энергию электрона считать равной нулю. Масса электрона $m = 9,10938 \cdot 10^{-31}$ кг, заряд электрона $e = -1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Решение:

Между катодом и анодом электронно-лучевой трубки создано электрическое поле, ускоряющее электроны. После прохождения анода электрон движется далее к экрану равномерно. Время его движения до экрана равно

$$t = \frac{S}{v}, \quad (15.4)$$

где v – скорость, до которой был ускорен электрон.

Работа электрического поля, совершённая при перемещении электрона от катода к аноду, равна

$$A = eU. \quad (15.5)$$

Благодаря работе электрического поля кинетическая энергия электрона увеличивается, причём

$$A = E_{\kappa} - E_{\kappa 0},$$

где E_{κ} – конечная кинетическая энергия электрона;

$E_{\kappa 0}$ – начальная кинетическая энергия электрона.

По условию задачи $E_{\kappa 0} = 0$,

тогда

$$A = E_{\kappa}. \quad (15.6)$$

Кинетическая энергия электрона определяется его массой и скоростью:

$$E_{\kappa} = \frac{mv^2}{2}. \quad (15.7)$$

Из соотношений (15.4) – (15.7) имеем

$$t = S\sqrt{\frac{m}{2eU}},$$

$$t = 0,25 \text{ м} \sqrt{\frac{9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 4 \cdot 10^3 \text{ В}}},$$

$$t = 6,7 \cdot 10^{-9} \text{ с}.$$

Действия с единицами измерений:

$$\text{м} \cdot \sqrt{\frac{\text{кг}}{\text{Кл} \cdot \text{В}}} = \text{м} \cdot \sqrt{\frac{\text{кг}}{\text{Кл} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}}} = \text{м} \cdot \sqrt{\frac{\text{кг}}{\text{Н} \cdot \text{м}}} = \text{м} \cdot \sqrt{\frac{\text{кг}}{\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м}}} = \text{м} \cdot \sqrt{\frac{\text{с}^2}{\text{м}^2}} = \text{с}.$$

Ответ: $t = 6,7 \cdot 10^{-9} \text{ с}$.



Задача 4. Потенциал электрического поля системы зарядов φ неодинаков в разных точках пространства и изменяется по закону:

$$\varphi(x) = 100 \text{ В} + 20 \frac{\text{В}}{\text{м}} \cdot x,$$

$$\varphi(y) = 200 \text{ В},$$

$$\varphi(z) = 300 \text{ В.}$$

где x – значение координаты (в метрах). От координат y и z потенциал не зависит. Является ли данное электрическое поле однородным?

Решение:

Чтобы выяснить, является ли данное электрическое поле однородным, необходимо определить, одинакова или различна напряжённость поля в различных точках пространства.



15.1. В каких единицах измеряется напряжённость электрического поля?

Для вычисления напряжённости электрического поля воспользуемся формулой (14.11), устанавливающей связь между напряжённостью и потенциалом:

$$E_x = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x}, \quad (15.8)$$

где $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0$;

$\Delta x = x - x_0$ и Δx должно быть мало.

По условию задачи $\varphi(x) = 100 \text{ В} + 20 \frac{\text{В}}{\text{м}} \cdot x$.

Тогда $\Delta\varphi = (100 \text{ В} + 20 \frac{\text{В}}{\text{м}} \cdot x) - (100 \text{ В} + 20 \frac{\text{В}}{\text{м}} \cdot x_0)$,

$$\Delta\varphi = 20 \frac{\text{В}}{\text{м}} (x - x_0).$$

Подставив значения $\Delta\varphi$ и Δx в формулу (15.8), имеем

$$E_x = -\frac{20 \frac{\text{В}}{\text{м}} \cdot (x - x_0)}{x - x_0},$$

$$E_x = -20 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Проекции E_y и E_z вектора напряжённости \vec{E} равны нулю (докажите это).

Таким образом, проекции вектора напряжённости $(-20 \text{ В/м}; 0; 0)$ во всех точках пространства, где существует поле, одинаковы. Следовательно, вектор напряжённости везде одинаков, то есть данное поле однородно.

Задача 5. В электронно-лучевой (ЭЛТ) трубке поток электронов, имеющих скорость $v = 20\,000 \text{ км/с}$, попадает в пространство между вертикально отклоняющими пластинами длиной $L = 5 \text{ см}$, находящимися на расстоянии $d = 1 \text{ см}$ друг от друга (рис. 70). Определите вертикальное смещение электронов на выходе из пространства между пластинами, если на пластины подано напряжение $U = 30 \text{ В}$.

Решение:

Если на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ подано напряжение, то пластины приобретают электрический заряд и между пластинами создаётся электрическое поле. В случае, изображённом на рисунке 70, напряжённость электрического поля направлена вертикально

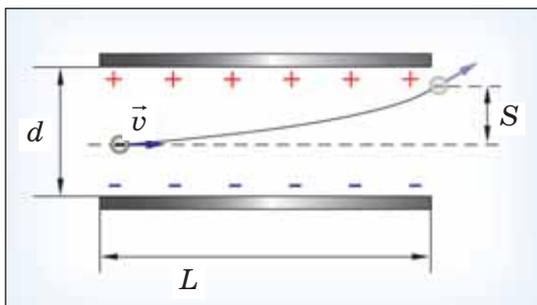


Рис. 70

вниз и на электрон – отрицательно заряженную частицу – будет действовать сила, направленная вертикально вверх. Под действием этой силы электрон в вертикальном направлении будет двигаться ускоренно, тогда как в горизонтальном направлении его движение будет равномерным.

Обозначим перемещение электрона в вертикальном направлении как S .

Тогда

$$S = \frac{at^2}{2}, \quad (15.9)$$

где a – ускорение, с которым движется электрон;

t – время движения электрона между пластинами.

В формуле (15.9) учтено, что начальная скорость электрона в вертикальном направлении равна нулю.

Время движения электрона между пластинами – это время, которое потребуется электрону, чтобы со скоростью v пролететь в горизонтальном направлении расстояние L (L – длина пластин).

$$t = \frac{L}{v}.$$

Тогда соотношение (15.9) примет вид

$$S = \frac{aL^2}{2v^2}.$$

Осталось определить ускорение, с которым движется электрон в вертикальном направлении. Для этого необходимо:

- воспользоваться вторым законом Ньютона,
- выразить силу, действующую на электрон со стороны электрического поля, через напряжённость поля и заряд электрона,
- воспользоваться связью между напряжённостью и потенциалом для случая однородного поля.

Проделав соответствующие выкладки, получим следующее выражение:

$$a = \frac{U|e|}{md}.$$

Тогда окончательно имеем

$$S = \frac{U|e|L^2}{2mdv^2},$$

$$S = \frac{3 \cdot 10^1 \text{ В} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot (5 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2}{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot (2 \cdot 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}})^2} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$S = 1,6 \text{ мм}.$$

Действия с единицами измерений:

$$\frac{\text{В} \cdot \text{Кл} \cdot (\frac{\text{м}}{\text{с}})^2}{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot (\frac{\text{м}}{\text{с}})^2} = \frac{\text{В} \cdot \text{Кл} \cdot \text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{\text{В} \cdot \text{Кл}}{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = \frac{\text{В} \cdot \text{Кл}}{\text{Н}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Н}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Н}} = \text{м}.$$

Ответ: $S = 1,6 \text{ мм}$.

15.1 ● Для проведения эксперимента между двумя горизонтально расположенными металлическими пластинками, находящимися в вакууме на расстоянии 2 см друг от друга, необходимо создать электрическое поле напряжённостью 11 кН/Кл. Какое напряжение должно быть подано на пластины?

15.2 ● В атомной и ядерной физике широко применяется такая единица измерения энергии, как электронвольт (сокращённо обозначается эВ). Выпишите определение электронвольта. Скольким джоулям равен 1 эВ? Какова скорость электрона, если его кинетическая энергия составляет 1 кэВ?

15.3 ● Направление осей системы координат выбрано таким образом, что направление напряжённости однородного электрического поля совпадает с направлением оси координат X . Начертите график зависимости потенциала поля φ от координаты x , если напряжённость электрического поля равна 0,5 кН/м, а потенциал поля в точке, совпадающей с началом системы координат, равен -100 В .

15.4 ● Вблизи поверхности Земли напряжённость электрического поля Земли направлена вертикально вниз и равна 130 В/м. Какую наибольшую скорость теоретически может приобретать электрон, пройдя в электрическом поле Земли расстояние 0,5 м? Начальную скорость электрона считать равной нулю.

15.5 ● Заряженная частица, пройдя ускоряющую разность потенциалов 1 кВ, влетает в однородное электрическое поле так, что вектор скорости частицы перпендикулярен вектору напряжённости электрического поля. Напряжённость электрического поля 20 кВ/м. Начальную скорость частицы перед прохождением ею ускоряющей разности потенциалов считать равной нулю. Чему будет равен первоначально радиус кривизны траектории частицы при её движении в электрическом поле?

§ 16. ЗАКОН КУЛОНА



Только с открытием этого закона учение об электричестве было поставлено на количественную основу.

Из книги «Из истории физики и жизни её творцов» (автор Ф. М. Дягилев)

Вы уже знаете, что электрически заряженные тела взаимодействуют между собой.

Закон Кулона. Из всех случаев электрического взаимодействия наиболее простым является случай взаимодействия неподвижных, находящихся в вакууме небольших по размерам заряженных тел. Фраза «небольших по размерам» означает, что расстояние между телами во много раз больше их размеров, и в этом случае заряженные тела называют *точечными зарядами*.

Закон взаимодействия неподвижных точечных зарядов был экспериментально установлен французским инженером и физиком Шарлем Огюстеном Кулоном в 1785 году. В своей работе он использовал сконструированный им весьма чувствительный по тем временам прибор – крутильные весы (рис. 71).

Основной деталью крутильных весов являлась тонкая серебряная нить *1*, к которой прикреплено лёгкое горизонтальное коромысло *2*. К одному концу коромысла прикреплён маленький шарик *3*, к другому концу – противовес *4*.

Если поместить на некотором расстоянии от заряженного шарика *3* одноимённо заряженный шарик *5*, то шарики будут отталкиваться и нить закрутится. При этом сила электрического отталкивания будет уравновешена силой упругости, возникающей при деформации нити. По углу закручивания нити, который измерялся по шкале *6* прибора, можно было определять величину силы. В крутильных весах Кулона угол закручивания в 1° соответствовал значению силы всего около одной сотой миллиардной доли ньютона!

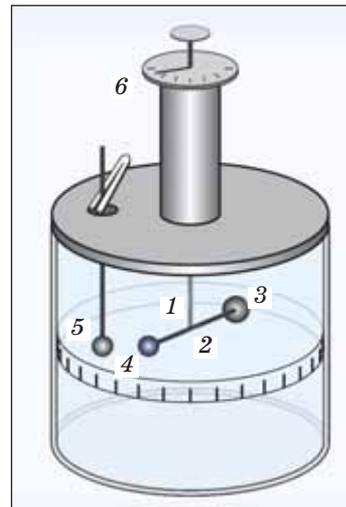


Рис. 71



Шарль Огюстен де Кулон (1736–1806). Французский инженер и физик, один из основателей электростатики. Исследовал деформацию кручения нитей, установил её законы. Изобрёл кругильные весы. Изучал закономерности сухого трения.

В результате проведённых опытов Кулон установил:

1. Сила взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними.

2. Сила взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов прямо пропорциональна произведению их зарядов q_1 и q_2 .

Математически закон Кулона принято записывать следующим образом:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (16.1)$$

где $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ – коэффициент пропорциональности;

постоянная ε_0 (читается: эpsilon нулевое) – электрическая постоянная,

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}.$$

Используется также и другая запись формулы закона Кулона:

$$F = k \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

где $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{К}^2}$ – коэффициент пропорциональности в законе Кулона.

Направление сил взаимодействия двух точечных зарядов также легко установить. В соответствии с третьим законом Ньютона тела взаимодействуют с силами, равными по величине и противоположными по направлению. Поэтому силы взаимодействия направлены вдоль линии, соединяющей заряды (рис. 72).

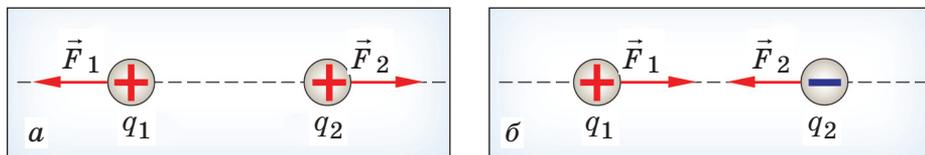


Рис. 72

Первоначально закон Кулона был сформулирован для случая взаимодействия неподвижных точечных зарядов в вакууме. В дальнейшем закон был уточнён на случай, если заряженные тела находятся не в вакууме, а в некоторой непроводящей среде – изоляторе (диэлектрике).

Если заряды помещены в вещество, то электрическое поле, созданное этими зарядами, действует на заряженные частицы в молекулах вещества, смещает (перераспределяет) заряженные частицы в молекулах, вызывает поворот молекул. В итоге заряженные частицы, имеющиеся в веществе, создают дополнительно электрическое поле, направленное противоположно внешнему полю. В результате напряжённость «суммарного» электрического поля меньше, а следовательно, меньше и сила взаимодействия зарядов, внесённых в среду.

Степень уменьшения силы кулоновского взаимодействия зарядов при переносе их из вакуума в среду называют *диэлектрической проницаемостью среды* ϵ .

Значения диэлектрической проницаемости некоторых веществ приведены в таблице 8.

Таблица 8. Диэлектрическая проницаемость некоторых веществ (при температуре 20 °С)

Вода	81	Спирт этиловый	26,8
Воздух (при атмосферном давлении)	1,00058	Стекло	5–16
Полиэтилен	2,3	Углекислый газ (при атмосферном давлении)	1,00096



16.1. Кулон проводил опыты по измерению силы взаимодействия между металлическими шариками, находящимися в воздухе. Мы же сформулировали закон Кулона для случая взаимодействия зарядов в вакууме. Почему это допустимо?

В случае взаимодействия зарядов, находящихся в диэлектрической среде, формула закона Кулона записывается в виде

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (16.2)$$

Напряжённость и потенциал поля точечного заряда. Закон Кулона позволяет определить основные характеристики электрического поля, источником которого является точечный заряд.

Наиболее просто определить напряжённость поля. Пусть источником поля является заряд q_0 и на расстоянии r от него в точке C находится заряд q (рис. 73).

Тогда на заряд q будет действовать электрическая сила:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Величина напряжённости электрического поля, создаваемого зарядом q_0 в точке C , равна (по определению)

$$E = \frac{F}{q},$$

или

в вакууме

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_0}{r^2}$$

в среде

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q_0}{r^2} \quad (16.3)$$

Величина напряжённости, как этого и следовало ожидать, зависит от величины заряда q_0 , создающего поле, и расстояния до заряда.



16.2. Каким – однородным или неоднородным – является поле точечного заряда?

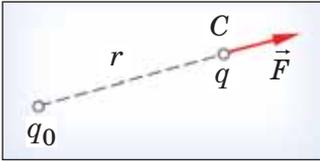


Рис. 73

Вывести формулу для расчёта потенциала поля точечного заряда является более сложным делом. По определению, потенциал φ есть отношение потенциальной энергии W взаимодействия заряда-источника поля q_0 и заряда q , находящегося от источника поля q_0 на некотором расстоянии r (рис. 73).

$$\varphi = \frac{W}{q}.$$

Для определения потенциальной энергии необходимо было бы подсчитать работу, которую совершит электрическое поле источника q_0 , «вытолкав» заряд из точки C в бесконечно удалённую точку (где поле будет действовать на заряд q с силой, практически равной нулю).

Но напряжённость поля E зависит от расстояния r , как это следует из формулы (16.3), следовательно, на заряд q будет действовать переменная сила. К сожалению, у нас сейчас недостаёт математических знаний, чтобы вычислить работу, совершаемую переменной силой!

По этой причине приведём формулы для вычисления потенциала поля точечного заряда без вывода:

в вакууме

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_0}{r}$$

в среде

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q_0}{r} \quad (16.4)$$

Лабораторная работа «Определение кулоновской силы».

Оборудование: весы с разновесами, измерительная лента, измерительная линейка, нить длиной 1,5–2 м, два кусочка фольги, стеклянная палочка, кусок ткани, штатив с муфтой и кольцом.



Задание 1. Определите силу взаимодействия между заряженными телами.

- Скатайте из кусочков фольги два одинаковых шарика. Измерьте их массу на весах.
- Прикрепите шарики к концам нити и перебросьте нить через кольцо штатива (рис. 74).
- Наэлектризуйте трением стеклянную палочку.
- Прикоснитесь палочкой к шарикам, они разойдутся. В процессе электризации шарики первоначально должны касаться друг друга, и так как шарики одинаковы по размерам, то они получат равные заряды:

$$q_1 = q_2 = q.$$



– Измерьте с помощью линейки расстояние r (рис. 74) между заряженными шариками (не касаясь их).

– Измерьте с помощью ленты длину подвеса шарика l (рис. 75, а).
Данные занесите в таблицу.

Масса шарика m , мг	Расстояние между шариками r , см	Длина подвеса l , см	Высота h , см

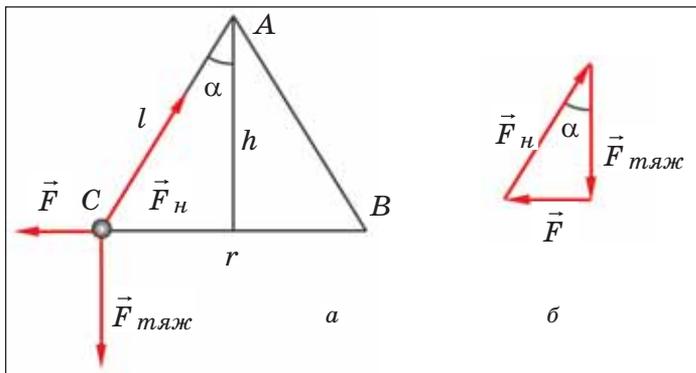


Рис. 75

– Вычислите силу взаимодействия между заряженными шариками F . Для этого необходимо рассмотреть, какие силы действуют на шарик (рис. 75, а). Это сила тяжести $\vec{F}_{тяж}$, искомая кулоновская сила \vec{F} , сила натяжения нити $\vec{F}_н$.

В соответствии со вторым законом Ньютона

$$m\vec{a} = \vec{F}_{тяж} + \vec{F} + \vec{F}_н.$$

Так как шарик покоится (его ускорение равно нулю), то равнодействующая сил, приложенных к шару, равна нулю:

$$\vec{F}_{тяж} + \vec{F} + \vec{F}_н = 0.$$

Проведём сложение векторов сил (рис. 75, б). К вектору силы тяжести $\vec{F}_{тяж}$ (вектор направлен вертикально вниз) добавим вектор \vec{F} (вектор направлен горизонтально) и добавим к нему вектор $\vec{F}_н$ (он направлен вдоль нити подвеса). Треугольник векторов должен замкнуться – ведь сумма этих векторов равна нулю. Так как направления векторов $\vec{F}_{тяж}$, \vec{F} и $\vec{F}_н$ совпадают со сторонами треугольника ABC (рис. 75, а), то соответствующие углы в этих треугольниках равны.

Из треугольника сил

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F}{F_{тяж}},$$

из треугольника ABC

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\frac{1}{2}r}{h}.$$

Тогда

$$\frac{F}{F_{тяж}} = \frac{\frac{1}{2}r}{h},$$

$$F = \frac{rF_{тяж}}{2h}.$$

Так как сила тяжести равна

$$F_{тяж} = mg,$$

то окончательно имеем

$$F = \frac{rmg}{2h}.$$

Задание 2. Определите электрический заряд шарика.

Так как размеры шариков много меньше расстояния между ними, то заряженные шарики можно считать точечными зарядами. Это позволяет воспользоваться формулой закона Кулона и определить значение заряда шарика q , так как сила взаимодействия F известна.

16.1 ● С какой силой взаимодействуют два точечных заряда 10 и 20 нКл, находящиеся в вакууме на расстоянии 3 см друг от друга?

16.2 ● На каком расстоянии в вакууме должны находиться друг от друга два электрона, чтобы они взаимодействовали с силой 2,3 нН?

16.3 ● Радиус атома водорода составляет $0,529 \cdot 10^{-10}$ м. Определите силу кулоновского взаимодействия электрона с ядром атома, напряжённость и потенциал электрического поля ядра атома на этом расстоянии.

16.4 ● На рисунке 76 изображён график зависимости напряжённости электрического поля точечного заряда, находящегося в воде, от расстояния до заряда. Чему равно значение заряда, являющегося источником поля?

16.5 ● Два протона, имеющие скорости 15 000 км/с, движутся навстречу друг другу. Определите минимальное расстояние, на которое могут сблизиться частицы.

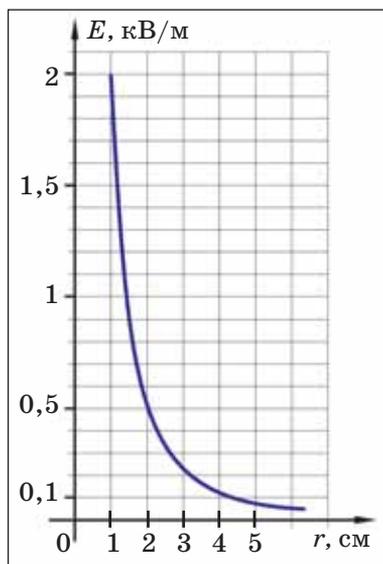


Рис. 76

§ 17. КОНДЕНСАТОРЫ



Физика! Какая ёмкость слова!
Физика для нас не просто звук!
Физика – опора и основа
Всех без исключения наук!

Из студенческой песни

Вы уже знаете, что такое конденсаторы и где они могут быть использованы.

Конденсатор – накопитель заряда и энергии. Простейший конденсатор представляет собой две плоскопараллельные пластины, разделённые слоем изолятора (рис. 77).

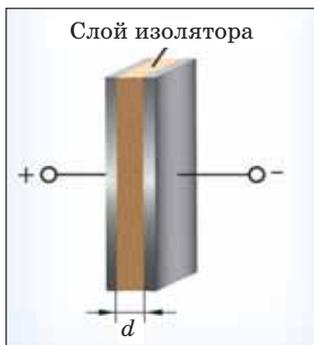


Рис. 77

Если сообщить пластинам конденсатора разноимённый заряд, то между пластинами (их называют обкладками) будет существовать электрическое поле, обладающее определённой энергией. Таким образом, конденсатор является устройством для накопления электрического заряда и энергии.

Свойство конденсатора сохранять определённый электрический заряд характеризуют величиной электроёмкостью (или сокращённо ёмкостью). Электроёмкость обозначают буквой C .

Электроёмкостью конденсатора C называют величину, равную отношению заряда положительной обкладки конденсатора q к разности потенциалов U между ними.

$$C = \frac{q}{U}. \quad (17.1)$$

Почему электроёмкость определена именно таким образом? Если конденсатор обладает большой ёмкостью, это означает, что им может быть накоплен большой заряд q . При этом напряжение (разность потенциалов) U между обкладками конденсатора должно быть невелико, так как в противном случае может произойти пробой диэлектрика – утечка зарядов через изолятор.

Чем больше будет заряд конденсатора, тем больше напряжённость электрического поля E между обкладками конденсатора:

$$E \sim q. \quad (17.2)$$

В соответствии с формулой (14.13), устанавливающей связь между разностью потенциалов (напряжением) и напряжённостью однородного электрического поля, разность потенциалов U прямо пропорциональна напряжённости поля E .

$$U \sim E.$$

Или с учётом (17.2)

$$U \sim q.$$

Значит, отношение q/U – электроёмкость конденсатора – не зависит ни от величины заряда q , ни от разности потенциалов U , а определяется только свойствами накопительной системы – конденсатора.

Проделаем опыт. К пластинам плоского конденсатора присоединим электромметр (рис. 78). Сообщим конденсатору заряд.

Не меняя расстояния между пластинами, сдвинем одну из них в сторону. При этом показания электромметра увеличиваются. Но увеличение разности потенциалов U свидетельствует об уменьшении электроёмкости конденсатора [смотрите формулу (17.1)]. *Чем меньше площадь пластин конденсатора, тем меньше его электроёмкость.*



17.1. Каков принцип действия конденсатора переменной ёмкости (рис. 79, а, б)?

Вернём пластины конденсатора в первоначальное положение и затем увеличим расстояние между пластинами. При этом разность потенциалов увеличивается.

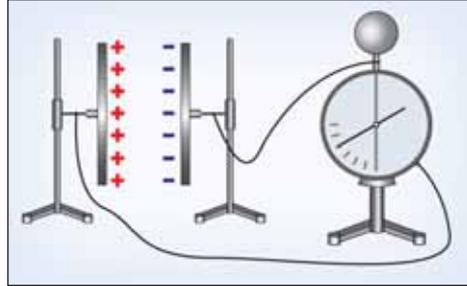


Рис. 78



17.2. Как электроёмкость конденсатора зависит от расстояния между обкладками конденсатора?

Чем больше расстояние между обкладками конденсатора, тем меньше его электроёмкость.

В различных радиотехнических устройствах часто используют так называемые электролитические конденсаторы (рис. 80). В них одной обкладкой является алюминиевая фольга, другой обкладкой – бумага, пропитанная электролитом. Фольгу и бумагу скручивают и помещают в цилиндрический корпус. Под действием электролита алюминиевая фольга окисляется, и в результате слоем диэлектрика, разделяющим обкладки конденсатора, является тонкий слой оксида алюминия (Al_2O_3).



а



б



Рис. 80

Рис. 79



17.3. Почему электролитические конденсаторы имеют значительную ёмкость в сравнении с другими типами конденсаторов таких же размеров?

Ёмкость конденсатора также зависит от диэлектрической проницаемости диэлектрика, разделяющего обкладки конденсатора. Это также подтверждается опытом: поместив между обкладками конденсатора (рис. 78) пластину из оргстекла, мы обнаружим уменьшение разности потенциалов.

Единица ёмкости называется фарад (сокращённо обозначается Ф) в честь Майкла Фарадея.

$$1 \text{ Ф} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}.$$

На практике чаще применяют дольные единицы – микрофарад и пикофарад.

$$1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф},$$

$$1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}.$$

Энергия электрического поля. Если сообщить обкладкам конденсатора заряд (зарядить конденсатор), то между обкладками конденсатора будет существовать электрическое поле. Разноимённые обкладки будут притягиваться друг к другу, то есть электрическое поле может совершить работу, а значит, *электрическое поле обладает энергией.*

Вычислим, чему равна энергия электрического поля заряженного конденсатора. Представим, что левая положительно заряженная пластина-обкладка конденсатора закреплена, а правая отрицательно заряженная пластина не закреплена и может свободно перемещаться (рис. 81). Тогда правая пластина будет притянута к левой пластине, они соприкоснутся и положительные и отрицательные заряды пластин будут нейтрализованы. При этом энергия ранее существовавшего электрического поля этих зарядов станет равной нулю. На что же была потрачена эта энергия? Очевидно, что на совершение работы A

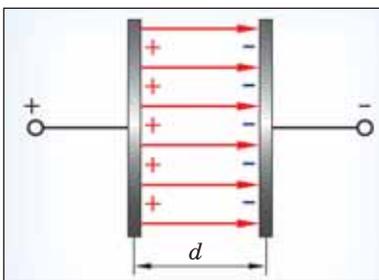


Рис. 81

электрическим полем зарядов, которые находились на левой пластине, по перемещению зарядов q , находившихся на правой пластине. Обозначим энергию электрического поля как W . Тогда очевидно, что

$$W = A. \quad (17.3)$$

Так как поле, создаваемое пластиной, является однородным, то на заряды действует постоянная сила и работа равна

$$A = Fd, \quad (17.4)$$

где d – первоначальное расстояние между пластинами.

Как определить силу, действующую на заряд? Конечно, закон Кулона в этой ситуации не может быть применён (почему?). Выразим силу через такую характеристику электрического поля, как напряжённость:

$$F = E_{nl} \cdot q, \quad (17.5)$$

где E_{nl} – напряжённость поля левой пластины.

Из соотношений (17.3) – (17.5) имеем

$$W = E_{nl} qd. \quad (17.6)$$

Электрическое поле в конденсаторе создаётся двумя заряженными пластинами. На рисунке 81 показан ход силовых линий электрического поля положительно заряженной пластины и электрического поля отрицательно заряженной пластины. Так как заряды пластин по модулю равны, то очевидно, что напряжённость поля одной пластины есть половина напряжённости электрического поля конденсатора E .

$$E_{nl} = \frac{E}{2}.$$

Подставим полученный результат в формулу (17.6):

$$W = \frac{Eqd}{2}. \quad (17.7)$$

Вспомним, какова связь между напряжённостью и разностью потенциалов (напряжением) для случая однородного поля [формула (14.13)]:

$$E = \frac{U}{d}.$$

Тогда выражение (17.1) примет вид

$$W = \frac{Uq}{2}. \quad (17.8)$$

Если использовать формулу (17.1), определяющую ёмкость

$$C = \frac{q}{U},$$

то несложно получить и другие выражения для расчёта энергии электрического поля:

$$W = \frac{q^2}{2C} \quad (17.9)$$

и

$$W = \frac{CU^2}{2}. \quad (17.10)$$

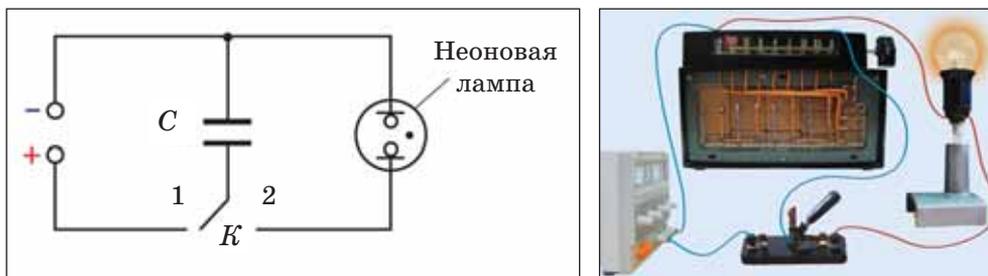


Рис. 82

Возьмём батарею конденсаторов и зарядим её (рис. 82), переведя ключ K в положение 1. Переведём ключ K в положение 2 и замкнём с его помощью заряженный конденсатор на неоновую лампу. Лампа вспыхнет – произошёл газовый разряд в лампе за счёт энергии электрического поля конденсатора. Увеличим ёмкость батареи конденсаторов и наблюдаем, как при этом возрастает яркость вспышки неоновой лампы. Не меняя ёмкость батареи конденсаторов, увеличим напряжение на конденсаторах. Яркость вспышки лампы также при этом возрастает.

Результаты опытов убеждают, что энергия электрического поля действительно тем больше, чем больше электроёмкость конденсатора и напряжение, до которого он заряжен.

Применение конденсаторов. Конденсаторы находят широкое и разнообразное применение в различных электро- и радиотехнических устройствах. Вот только несколько примеров. Изменение расстояния между обкладками конденсатора приводит к изменению электроёмкости конденсатора, и на этом принципе сконструированы измерители малых перемещений. Изменение концентрации водяного пара в атмосфере приводит к изменению диэлектрических свойств воздуха (диэлектрической проницаемости среды), и это используется в ёмкостных измерителях влажности воздуха.



17.4. Как конденсатор может быть использован в приборе для контроля уровня жидкости-диэлектрика?

Так как конденсаторы способны длительное время сохранять сообщённый им заряд, то на их основе разработаны различного типа ячейки памяти современных процессоров. Способность конденсатора быть накопителем энергии электрического поля используется, например, в лампе-фотовспышке, где при быстром разряде конденсатора возникает мощный импульс света.



17.5. Что такое колебательный контур? Для чего он предназначен?



Соединение конденсаторов. Конденсаторы, как и другие элементы электрической цепи, можно соединять параллельно (рис. 83, а) и последовательно (рис. 83, б).

Общая ёмкость батареи конденсаторов при их параллельном и последовательном соединениях рассчитывается по следующим формулам:

При параллельном соединении

$$C = C_1 + C_2 + \dots \quad (17.11)$$

При последовательном соединении

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \quad (17.12)$$

Приведём доказательство этих формул.

Параллельное соединение.

Пусть батарея параллельно соединённых конденсаторов подключена к источнику с напряжением U (рис. 83, а).

Очевидно, что напряжение U_1 на первом конденсаторе и напряжение U_2 на втором конденсаторе одинаковы.

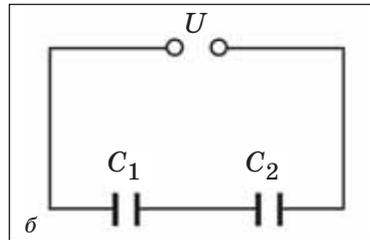
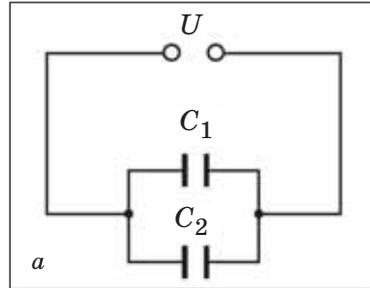


Рис. 83

$$U_1 = U_2 = U. \quad (17.13)$$

Если первый конденсатор при зарядке получил заряд $q_1 = C_1 U_1$, второй конденсатор получил заряд $q_2 = C_2 U_2$, то общий заряд q батареи конденсаторов равен

$$q = C_1 U_1 + C_2 U_2. \quad (17.14)$$

С другой стороны,

$$q = CU, \quad (17.15)$$

где C – ёмкость батареи конденсаторов.

Сравнивая соотношения (17.14) и (17.15), с учётом соотношения (17.13) имеем

$$C = C_1 + C_2,$$

что требовалось доказать.

Последовательное соединение.

Пусть батарея последовательно соединённых конденсаторов подключена к источнику с напряжением U (рис. 83, б). Очевидно, что

$$U = U_1 + U_2,$$

где U_1 и U_2 – напряжение на первом и втором конденсаторах.

Воспользуемся формулой (17.1), определяющей ёмкость:

$$\frac{q}{C} = \frac{q_1}{C_1} + \frac{q_2}{C_2}, \quad (17.16)$$

где C – ёмкость батареи конденсаторов;

q, q_1, q_2 – заряды батареи конденсаторов, заряд первого конденсатора, заряд второго конденсатора соответственно.

Если при зарядке батареи конденсаторов по цепи прошёл заряд q , то левой обкладкой конденсатора C_1 (рис. 83, б) получен заряд q_1 , равный заряду q :

$$q_1 = q. \quad (17.17)$$

Одновременно с правой обкладки конденсатора C_2 должен уйти заряд q_2 , равный заряду q (ведь в этой замкнутой системе должен выполняться закон сохранения заряда!):

$$q_2 = q. \quad (17.18)$$

С учётом соотношений (17.17) и (17.18) соотношение (17.16) примет вид

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

Что требовалось доказать.

Ёмкость конденсатора, $C = \frac{q}{U}$, фарад, ёмкость плоского конденсатора определяется площадью обкладок конденсатора, расстоянием между ними и диэлектрической проницаемостью среды, заполняющей конденсатор, **энергия конденсатора, $W = \frac{CU^2}{2}$, параллельное и последовательное соединение конденсаторов: $C = C_1 + C_2, \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$.**

17.1 ● Какой заряд может быть накоплен конденсатором ёмкостью 500 мкФ при зарядке его до напряжения 50 В?

17.2 ● До какого напряжения была заряжена батарея конденсаторов ёмкостью 58 мкФ, если энергия электрического поля конденсаторов составила 1,16 Дж?

17.3 ● Резисторы сопротивлением 11 Ом и 1 Ом соединены последовательно и подключены к источнику тока напряжением 12 В. Чему будет равен заряд на обкладках конденсатора ёмкостью 6 мкФ, если его подключить параллельно к резистору с большим сопротивлением?

17.4 ● Какие значения ёмкости можно получить, располагая конденсаторами ёмкостью 2,0; 4,0; 6,0 мкФ?

17.5 ● Конденсатор ёмкостью C зарядили от источника так, что заряд на конденсаторе равен q . Чему равна энергия электрического поля конденсатора? После этого заряженный конденсатор подключили к незаряженному конденсатору такой же ёмкости. Чему равна общая энергия электрического поля двух конденсаторов после перераспределения заряда? Почему эта энергия меньше первоначальной энергии заряженного конденсатора?

§ 18. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК



Эдисон вспоминал: «Ещё мальчиком я настойчиво пытался выяснить, как и почему работает телеграф. Лучшее объяснение, которое я когда-либо получил, дал мне старик шотландец, ремонтировавший линии: «Если бы у тебя была такса длиной от Эдинбурга до Лондона, то, дёрнув её за хвост в Эдинбурге, ты бы заставил залаять её в Лондоне». Мне это было понятно, но я не мог добраться до сути того, что же двигалось по телу собаки или вдоль проволоки».

Из книги «Эдисон»

(автор Михаил Яковлевич Лапиров-Скобло)

Вам уже знакомо понятие «электрический ток».

Электрический ток. Сила тока. Электрический ток – упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц. Как вам известно, это явление обнаруживается по тепловому, химическому и магнитному действию, производимому электрическим током.



18.1. Какие примеры практического применения теплового, химического и магнитного действия тока вам известны?

При выполнении каких условий существует электрический ток? *Во-первых*, необходимо наличие свободных заряженных частиц. Вещества, в которых имеются такие частицы, относятся к проводникам, например, это металлы, водные растворы солей, кислот и оснований. *Во-вторых*, необходимо, чтобы в проводнике существовало электрическое поле, которое действовало бы силой на заряженные частицы, создавая и поддерживая их направленное движение. При перемещении зарядов в проводнике электрическим полем совершается работа.

Электрический ток характеризует величина *сила тока*. Чем больший заряд ежесекундно проходит по проводнику, тем больше сила тока в проводнике. Иными словами, сила тока определяется величиной заряда, проходящего по проводнику в единицу времени.

Сила тока – физическая величина, равная отношению заряда Δq , переносимого через сечение проводника за интервал времени Δt , к этому интервалу времени.

Обозначим силу тока буквой I .

Тогда

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} . \quad (18.1)$$

Произнося слово «сила», мы по «механической» привычке представляем себе, что речь идёт о векторной величине. Но сила тока, как следует из определения, – величина скалярная (по этой причине следует признать, что исторически укоренившееся название «сила тока» не является вполне удачным).

Единица силы тока – *ампер* (сокращённо обозначается А). Эта единица установлена на основе магнитного действия тока. 1 А равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, вызывал бы на участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия $2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}^1$.

Формула (18.1), определяющая силу тока, позволяет установить связь между единицей измерения заряда кулон и единицей силы тока ампер. Из выражения (18.1) следует, что

$$\Delta q = I \Delta t.$$

Таким образом,

$$1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}.$$



Чем больше заряженных частиц проходит каждую секунду через поперечное сечение проводника, тем, очевидно, сила тока больше. Движение же частиц определяется их скоростью. Выясним, какова связь силы тока со скоростью направленного движения частиц. Пусть проводник имеет поперечное сечение s и частицы (заряд каждой частицы q_0) движутся со средней скоростью \bar{v} (рис. 84).

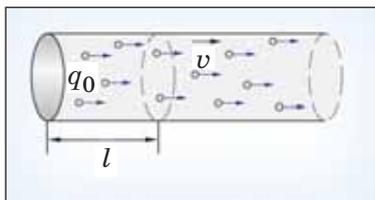


Рис. 84

или с учётом соотношения (18.2)

Тогда за время Δt все частицы, находящиеся на расстоянии

$$l = \bar{v} \Delta t, \quad (18.2)$$

успеют долететь до выделенного сечения проводника. Объём V , в котором находились частицы, очевидно, равен

$$V = sl,$$

$$V = s \bar{v} \Delta t. \quad (18.3)$$



18.2. Что такое концентрация? Как определяется концентрация?

¹ Определение ампера приведено для справки. Запоминать его не нужно.

Если концентрация заряженных частиц в проводнике равна n , то

$$n = \frac{N}{V},$$

где N – число заряженных частиц в объёме V .

Отсюда

$$N = nV.$$

Тогда за время Δt через поперечное сечение проводника пройдёт заряд Δq , равный

$$\Delta q = q_0 N,$$

или

$$\Delta q = q_0 nV.$$

С учётом соотношения (18.3) имеем

$$\Delta q = q_0 ns\bar{v} t. \quad (18.4)$$

Воспользуемся полученным соотношением (18.4) и формулой (18.1), определяющей силу тока. Тогда

$$I = q_0 ns\bar{v}. \quad (18.5)$$

Используя выведенную формулу, оценим скорость упорядоченного движения, например, в меди – одном из лучших проводников.

$$\bar{v} = \frac{I}{q_0 ns}.$$

Пусть $I = 1$ А. Носителями заряда в металлах являются электроны,

$$q_0 = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Решая в § 3 задачу 3, мы определили концентрацию атомов меди, она равна $8,4 \cdot 10^{28} \text{ 1/м}^3$. В меди каждый атом отдаёт по одному электрону, следовательно, концентрация свободных электронов $8,4 \cdot 10^{28} \text{ 1/м}^3$. Пусть $s = 1 \text{ мм}^2$ ($s = 10^{-6} \text{ м}^2$). Проведём расчёт.

$$\bar{v} = \frac{1 \text{ А}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 8,4 \cdot 10^{28} \frac{1}{\text{м}^3} \cdot 10^{-6} \text{ м}^2},$$

$$\bar{v} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ м/с,}$$

$$\bar{v} = 0,07 \text{ мм/с.}$$



18.3. Не является ли результат, полученный при расчёте скорости упорядоченного движения электронов в металле, парадоксальным? Ведь при замыкании ключа в электрической цепи ток в цепи возникает практически мгновенно.

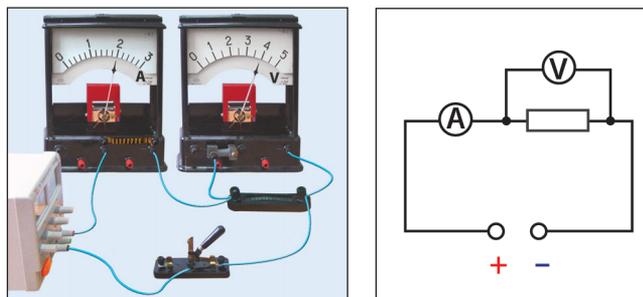


Рис. 85

Закон Ома для участка цепи. Для измерения силы тока используется прибор *амперметр*. Амперметр включается последовательно с тем участком цепи, в котором нужно измерить силу тока (рис. 85). Разность потенциалов (напряжение) на исследуемом участке цепи измеряют *вольтметром*, который подключают параллельно участку.

Увеличим напряжение на участке цепи U . Мы обнаружим, что при этом и сила тока в участке цепи I пропорционально увеличится. Рассмотренный опыт иллюстрирует закон Ома для участка цепи.

Сила тока в участке цепи прямо пропорциональна разности потенциалов (напряжению) на концах этого участка.

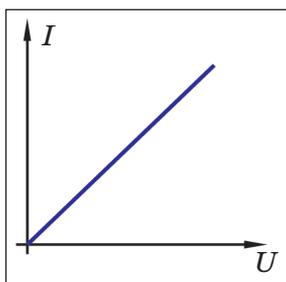


Рис. 86

$$I \sim U.$$

Графически закон Ома для участка цепи представляют как график зависимости силы тока от напряжения (рис. 86). Такой график называют вольт-амперной характеристикой.

Математическое выражение закона Ома для участка цепи имеет вид

$$I = \frac{U}{R}, \quad (18.6)$$

где R – электрическое сопротивление участка цепи.

Электрическое сопротивление (или просто сопротивление) – величина, характеризующая противодействие проводника электрическому току. Единица сопротивления – ом (сокращённо обозначается Ом).

Сила тока I в участке цепи численно равна отношению разности потенциалов (напряжения) на концах этого участка U к его сопротивлению R .

Основной закон электротехники был установлен известным немецким физиком Георгом Симоном Омом (1787–1854) и носит его имя.

Последовательное и параллельное соединение проводников.

Выясним основные закономерности для случая последовательного и параллельного соединения проводников (резисторов).

Последовательное соединение.

При последовательном соединении отдельные проводники соединяют друг за другом, образуется неразветвлённая цепь (рис. 87).

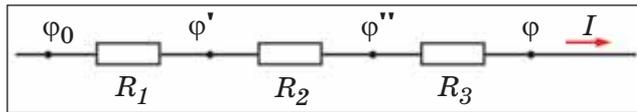


Рис. 87

Ежесекундно через поперечное сечение любого проводника проходит одно и то же число заряженных частиц. Следовательно, сила тока во всех участках цепи – резисторах R_1 , R_2 , R_3 – одинакова.

$$I_1 = I_2 = I_3 = I.$$

При последовательном соединении во всех проводниках сила тока одна и та же.

Разность потенциалов (напряжение) U на концах цепи равна

$$U = \varphi_0 - \varphi,$$

где φ_0 и φ – соответственно потенциалы начальной и конечной точек цепи.

С другой стороны,

$$U = \varphi_0 - \varphi' + \varphi' - \varphi'' + \varphi'' - \varphi,$$

где φ' и φ'' – потенциалы точек, обозначенных на рисунке 87.

Таким образом,

$$U = U_1 + U_2 + U_3, \quad (18.7)$$

где U_1 , U_2 , U_3 – напряжения на резисторах R_1 , R_2 , R_3 соответственно.

При последовательном соединении общее напряжение равно сумме напряжений на отдельных проводниках.

По закону Ома для участка цепи

$$I = \frac{U}{R_{\text{носл}}},$$

где $R_{\text{носл}}$ – сопротивление участка цепи, состоящего из последовательно соединённых проводников,

$$R_{\text{носл}} = \frac{U}{I}.$$

Разделим левую и правую части равенства (18.7) на силу тока I .

Тогда

$$\frac{U}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} + \frac{U_3}{I},$$

или

$$\frac{U}{I} = \frac{U_1}{I_1} + \frac{U_2}{I_2} + \frac{U_3}{I_3}.$$

Таким образом,

$$R_{\text{посл}} = R_1 + R_2 + R_3.$$

При последовательном соединении проводников общее сопротивление цепи равно сумме сопротивлений отдельных проводников.

Параллельное соединение.

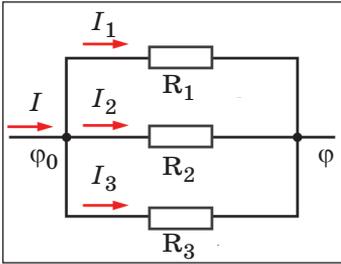


Рис. 88

При параллельном соединении электрическая цепь разветвляется, начала отдельных проводников соединяются в одной общей начальной точке, а концы этих проводников – в другой общей конечной точке (рис. 88).

При таком соединении часть заряженных частиц проходит через резистор R_1 , часть – через резистор R_2 , часть – через резистор R_3 . Следовательно,

$$I = I_1 + I_2 + I_3, \quad (18.8)$$

где I – сила тока в неразветвлённой цепи;

I_1, I_2, I_3 – сила тока в резисторах R_1, R_2, R_3 соответственно.

При параллельном соединении сила тока в неразветвлённой части цепи равна сумме сил токов отдельных, параллельно соединённых, проводников.

Одинаковыми или разными будут напряжения U_1, U_2, U_3 на отдельных проводниках при их параллельном соединении? Очевидно, напряжения будут одинаковыми, так как они равны разности потенциалов

$$U = \varphi_0 - \varphi$$

между начальной и конечной общими точками.

$$U_1 = U_2 = U_3 = U.$$

Напряжение на параллельно соединённых проводниках одинаково.

Разделим левую и правую части равенства (18.8) на напряжение U .

$$\frac{I}{U} = \frac{I_1}{U} + \frac{I_2}{U} + \frac{I_3}{U},$$

или

$$\frac{I}{U} = \frac{I_1}{U_1} + \frac{I_2}{U_2} + \frac{I_3}{U_3}.$$

Левая часть последнего равенства – величина, обратная сопротивлению участка цепи, состоящего из отдельных проводников, $R_{\text{парал}}$. В правой части равенства – сумма обратных значений сопротивлений отдельных проводников, соединённых параллельно.

$$\frac{1}{R_{\text{парал}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$$

При параллельном соединении величина, обратная общему сопротивлению участка цепи, состоящего из параллельно соединённых проводников, равна сумме обратных значений сопротивлений проводников, соединённых параллельно.

Пусть, например, имеются три резистора, сопротивления которых равны $R_1 = 3 \text{ Ом}$, $R_2 = 4 \text{ Ом}$, $R_3 = 5 \text{ Ом}$. Тогда при последовательном соединении резисторов их общее сопротивление $R_{\text{посл}}$ равно

$$\begin{aligned} R_{\text{посл}} &= R_1 + R_2 + R_3, \\ R_{\text{посл}} &= 3 \text{ Ом} + 4 \text{ Ом} + 5 \text{ Ом}, \\ R_{\text{посл}} &= 12 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

При параллельном соединении резисторов

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{\text{парал}}} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}, \\ \frac{1}{R_{\text{парал}}} &= \frac{1}{3 \text{ Ом}} + \frac{1}{4 \text{ Ом}} + \frac{1}{5 \text{ Ом}}, \\ \frac{1}{R_{\text{парал}}} &= \frac{4 \text{ Ом} \cdot 5 \text{ Ом} + 3 \text{ Ом} \cdot 5 \text{ Ом} + 3 \text{ Ом} \cdot 4 \text{ Ом}}{3 \text{ Ом} \cdot 4 \text{ Ом} \cdot 5 \text{ Ом}} = \frac{47}{60 \text{ Ом}}, \\ R_{\text{парал}} &= 1,3 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Как видно, общее сопротивление участка при параллельном соединении проводников меньше сопротивления любого из проводников, его составляющих.

Работа и мощность тока. Для поддержания постоянного тока в проводнике должно существовать электрическое поле. При перемещении электрических зарядов, при прохождении тока полем совершается работа. Пусть по участку цепи прошёл заряд Δq . Тогда, как следует из формулы (14.5), электрическим полем совершена работа A , равная

$$A = U\Delta q.$$

Если сила тока в цепи равна I , то за время Δt по цепи проходит заряд, равный

$$\Delta q = I\Delta t.$$

Таким образом, работа электрического поля равна

$$A = UI\Delta t. \quad (18.9)$$

На что расходуется работа, совершаемая электрическим полем? Чаще всего за счёт работы электрического поля происходит нагревание проводника, увеличение его внутренней энергии и выделяется количество теплоты Q .

$$Q = A,$$

$$Q = UI\Delta t.$$

В соответствии с законом Ома для участка цепи

$$I = \frac{U}{R},$$

где R – сопротивление участка цепи.

Отсюда

$$U = IR.$$

Тогда выражение (18.9) примет вид

$$Q = I^2 R\Delta t. \quad (18.10)$$

Количество теплоты, выделяющееся при прохождении тока в проводнике, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и интервала времени. Этот закон, как вам известно, носит название закона Джоуля и Ленца.



18.4. Что характеризует физическая величина мощность?

Для того чтобы охарактеризовать быстроту совершения работы электрическим полем при прохождении тока в цепи, чтобы охарактеризовать тепловыделение в единицу времени, введено понятие *электрическая мощность (мощность тока)*.

Обозначим электрическую мощность буквой P , работу электрического поля A , интервал времени, за который совершается работа, Δt . Тогда

$$P = \frac{A}{\Delta t},$$

или с учётом выражения (18.8)

$$P = UI. \quad (18.11)$$

Электрическая мощность, выделяющаяся на участке цепи, равна произведению напряжения на этом участке на силу тока в участке.



18.5. Во сколько раз увеличится электрическая мощность, выделяющаяся на участке цепи, при увеличении напряжения на участке цепи в 2 раза? Сопротивление участка цепи считать неизменным.



18.6. Во сколько раз увеличится мощность, выделяющаяся на участке цепи, если сопротивление участка цепи уменьшится в 2 раза? Разность потенциалов на участке цепи считать неизменной.



18.7. Во сколько раз увеличится мощность, выделяющаяся на участке цепи, если сопротивление участка цепи увеличится в 2 раза при неизменной силе тока в цепи?

Единица измерения электрической мощности – ватт (сокращённо обозначается Вт). Единица измерения работы тока и количества теплоты, как вам известно, – джоуль. Однако на практике очень часто для расчёта работы тока применяется и внесистемная единица – киловатт-час (кВт·ч).

$$1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 1000 \text{ Вт}\cdot 3600 \text{ с},$$

$$1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 3\,600\,000 \text{ Вт}\cdot\text{с},$$

$$1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 3\,600\,000 \text{ Дж},$$

$$1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 3,6 \text{ МДж}.$$

Именно в киловатт-часах учитывают потреблённую электроэнергию счётчики электроэнергии, используемые в быту и на производстве.

Электрический ток, сила тока, $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А}\cdot\text{с}$, закон Ома для участка цепи, $I = \frac{U}{R}$, последовательное и параллельное соединение проводников, $R_{\text{посл}} = R_1 + R_2 + \dots$, $\frac{1}{R_{\text{парал}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$, работа тока, $A = UI\Delta t$, закон Джоуля и Ленца, $Q = I^2 R\Delta t$, мощность тока, $P = UI$, $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 3,6 \text{ МДж}$.

18.1 ● Сила тока в резисторе сопротивлением 20 Ом равна 0,6 А. Определите, какой заряд проходит через резистор за 1 мин. Чему равна разность потенциалов на резисторе? Какова работа тока на данном участке цепи за 2 мин? Какое количество теплоты выделяется в резисторе за 3 мин? Чему равна мощность тока?

18.2 ● На рисунке 89 изображена вольт-амперная характеристика проводника. Чему равно электрическое сопротивление данного проводника?

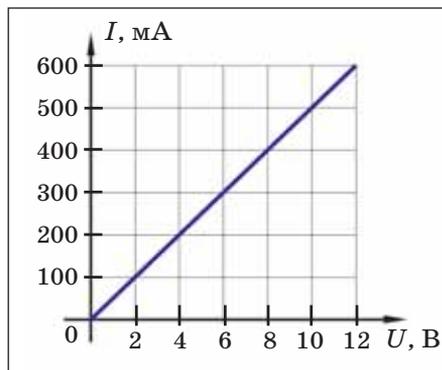


Рис. 89

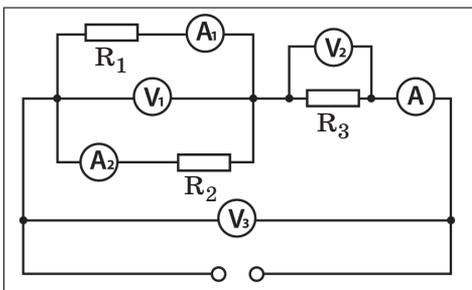


Рис. 90

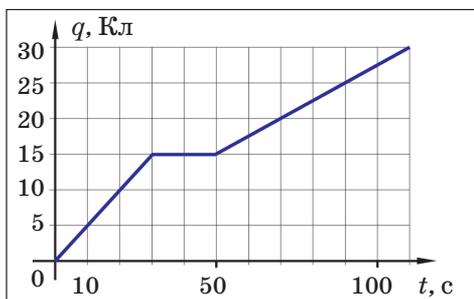


Рис. 91

– в цепь включаются оба нагревательных элемента, соединённых параллельно.

Какой из режимов необходимо выбрать для наиболее быстрого нагрева исследуемого препарата?

18.3 ● На рисунке 90 изображена схема электрической цепи. Амперметр A_1 показывает значение силы тока $0,4$ А. Каковы показания остальных электроизмерительных приборов, включённых в электрическую цепь? Сопротивления резисторов R_1 , R_2 , R_3 равны соответственно 10 , 20 , 30 Ом. Электроизмерительные приборы считать идеальными (то есть их включение в электрическую цепь не меняет распределение токов и напряжений в цепи).

18.4 ● На рисунке 91 изображён график зависимости величины электрического заряда q , прошедшего через поперечное сечение проводника, от времени t . Чему была равна сила тока в промежутке времени от 0 до 30 с? от 30 до 50 с? от 50 до 90 с?

18.5 ● В лабораторной электроплитке имеется два одинаковых нагревательных элемента. Возможны три режима работы электроплитки:

– в цепь включается только один нагревательный элемент,

– в цепь включаются оба нагревательных элемента, соединённых последовательно,

§ 19. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ



Час работы научит больше, чем день объяснений.

Жан Жак Руссо (1712–1778), французский писатель и философ

Вам уже известно, что сопротивление проводника зависит от длины проводника, площади поперечного сечения и вещества, из которого изготовлен проводник.

Удельное сопротивление. Электрические свойства вещества характеризует физическая величина, называемая *удельное электрическое сопротивление* (или просто *удельное сопротивление*). *Удельное сопротивление – величина, равная сопротивлению цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади поперечного сечения.*

Если длина проводника измерена в метрах, а площадь поперечного сечения в квадратных миллиметрах, то единица удельного сопротивления будет

$$\frac{\text{Ом}\cdot\text{мм}^2}{\text{м}}.$$

Так как

$$1 \text{ мм}^2 = (10^{-3} \text{ м})^2 = 10^{-6} \text{ м}^2,$$

то удельное сопротивление можно выразить также в Ом·м.

Значения удельного сопротивления для некоторых веществ приведены в таблице 9.

Таблица 9. Удельное сопротивление некоторых веществ, $\frac{\text{Ом}\cdot\text{мм}^2}{\text{м}}$, или 10^{-6} Ом·м (при температуре 20 °С)

Алюминий	0,028	Медь	0,017
Вольфрам	0,055	Никелин	0,40
Германий	$6 \cdot 10^5$	Нихром	1,1
Графит	13	Олово	0,12
Железо	0,10	Органическое стекло	$10^{17}-10^{19}$
Золото	0,024	Резина	$10^{17}-10^{18}$
Константан	0,50	Ртуть	0,96
Кремний	$3 \cdot 10^9$	Свинец	0,21
Манганин	0,43	Серебро	0,016

По величине удельного сопротивления вещества (с некоторой долей условности) принято подразделять на проводники, полупроводники и изоляторы (диэлектрики). К проводникам относятся вещества, чье удельное сопротивление меньше 10^{-5} Ом·м, к диэлектрикам – вещества, у которых удельное сопротивление больше 10^8 Ом·м.

Сопротивление проводника. Зависимость сопротивления проводника от его размеров и рода вещества, из которого изготовлен проводник, была установлена автором знаменитого закона – Георгом Симоном Омом. Он выяснил, что сопротивление металлических проводников тем больше, чем больше их длина и чем меньше площадь поперечного сечения (толщина проводника). Также сопротивление проводников зависит от их удельного сопротивления.

Из опытов, проведённых Омом, следовало, что сопротивление проводника может быть рассчитано по формуле

$$R = \rho \frac{l}{s}, \quad (19.1)$$

где ρ – удельное сопротивление проводника;

l – длина проводника;

s – площадь поперечного сечения проводника.



19.1. Что такое реостаты? Как они устроены?

Для чего предназначены реостаты?

Лабораторная работа «Определение длины и диаметра медной проволоки».

Оборудование: медная проволока, скрученная в моток, весы с разновесами, источник тока, амперметр, вольтметр, реостат, ключ, соединительные провода.

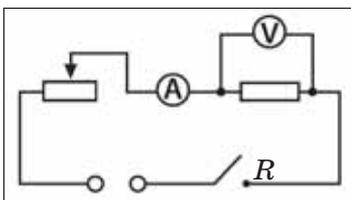


Рис. 92

Задание 1. Используя весы, измерьте массу проволоки.

Задание 2. Определите электрическое сопротивление медной проволоки, включив её в электрическую цепь, схема которой изображена на рисунке 92. (Проволока изображена на схеме как резистор R .)



19.2. С какой целью последовательно с медной проволокой в электрическую цепь включён реостат? В какое положение следует сдвинуть скользящий контакт реостата перед началом эксперимента?

Задание 3. Проведите расчёт и определите длину l и диаметр d проволоки.

Для этого вам необходимо выразить массу проволоки m и её электрическое сопротивление R через искомые величины.



19.3. Как рассчитать массу вещества плотностью ρ_0 , если объём вещества V ?

$$m = \rho_0 V. \quad (19.2)$$

Плотность меди известна:

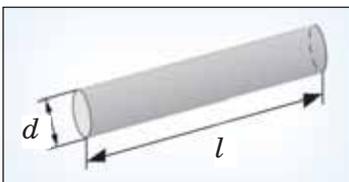


Рис. 93

$$\rho_0 = 8900 \text{ кг/м}^3.$$

Объём медной проволоки легко рассчитать как объём цилиндра (рис. 93) длиной l , имеющего площадь основания s (площадь поперечного сечения проволоки):

$$V = ls. \quad (19.3)$$



19.4. Как рассчитать площадь круга диаметром d ?

$$s = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (19.4)$$

Из соотношений (19.2) – (19.4) имеем

$$m = \frac{\rho_0 l \pi d^2}{4}. \quad (19.5)$$



19.5. Как рассчитать сопротивление проволоки?

$$R = \rho \frac{l}{s},$$

где ρ – удельное сопротивление меди.

$$s = \frac{\pi d^2}{4}.$$

Тогда

$$R = \frac{4\rho l}{\pi d^2}. \quad (19.6)$$

Таким образом, для определения длины медной проволоки l и её диаметра d необходимо решить систему уравнений (19.5) и (19.6):

$$\begin{cases} m = \frac{\pi \rho_0 l d^2}{4}, \\ R = \frac{4\rho l}{\pi d^2}. \end{cases}$$

Решите систему уравнений, получите ответ.

Удельное сопротивление, зависимость сопротивления проводника от его размеров, $R = \rho \frac{l}{s}$.

- 19.1 Чему равно сопротивление 1 км медного провода диаметром 0,4 мм?
- 19.2 Какова мощность электроплитки, нагревательный элемент которой изготовлен из нихромовой проволоки сечением 0,16 мм² и длиной 12 м? Электроплитка включена в сеть напряжением 220 В.
- 19.3 Какого диаметра манганиновая проволока была использована для изготовления реостата, имеющего полное сопротивление 100 Ом, если израсходовано 36 м проволоки?
- 19.4 Школьный лабораторный реостат на 6 Ом имеет цилиндрическую катушку длиной 8,8 см и диаметром 17,5 мм (рис. 94). Определите удельное сопротивление проволоки, использованной при изготовлении реостата, если диаметр проволоки 0,80 мм.



Рис. 94

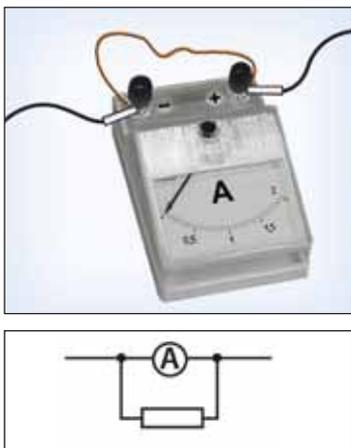


Рис. 95

19.5 ● Пусть в вашем распоряжении имеется лабораторный амперметр с пределом измерения силы постоянного тока 2 А. Предположим, что возникла необходимость измерить силу тока в цепи до 5 А. Это можно сделать, если снабдить прибор шунтом – проводником малого сечения, включённым параллельно прибору (рис. 95). При подключении шунта ток, идущий по цепи, разделится: часть тока пройдёт через амперметр, а часть тока – через шунт. Сопротивление шунта следует подобрать таким, чтобы при силе тока в цепи 5 А через амперметр шёл ток силой только в 2 А, а через шунт – «лишний ток» в 3 А. Какой должна быть длина медной проволоки диаметром 0,25 мм, используемой в качестве такого шунта? Внутреннее сопротивление лабораторного амперметра 0,09 Ом. Как можно расширить предел измерения вольтметра (при поиске ответа на этот вопрос обратитесь к дополнительной литературе)?

§ 20. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ

Вышеприведённые данные можно вполне удовлетворительно свести к уравнению

$$X = a/(b+x),$$

где X – сила магнитного действия на проводник, длина которого x , а a и b представляют собой постоянные величины.

*Из работы Г. Ома
«Определение закона,
по которому металлы проводят
контактное электричество...»*

Вам уже знакомо понятие «электрический ток».

Электродвижущая сила (ЭДС). Электрический ток – упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц, происходящее благодаря действию электрического поля на частицы.



20.1. Как рассчитывается работа, совершаемая электрическим полем при перемещении заряда?

Протекание тока – перемещение зарядов – сопровождается совершением работы электрическим полем. Работа электрического поля A на некотором участке электрической цепи (рис. 96) равна

$$A = qU, \quad (20.1)$$

где q – заряд, прошедший по электрической цепи;

U – напряжение (разность потенциалов).

$$U = \varphi_0 - \varphi,$$

$$A = q(\varphi_0 - \varphi).$$

Электрический ток проходит по замкнутой цепи, то есть заряды, «совершив путешествие» по электрической цепи, в итоге возвращаются в первоначальную точку:

$$\varphi = \varphi_0.$$

Но тогда работа электрического поля в замкнутой цепи будет равна нулю:

$$A = 0.$$



20.2. Может ли только одно электрическое поле и только одни электрические силы поддерживать постоянный электрический ток в замкнутой цепи?

Если работа электрического поля при перемещении заряда по замкнутой цепи равна нулю, то, следовательно, электрическую цепь необходимо дополнить «насосом по перекачке зарядов». Необходим *источник тока*, которым и совершается работа по поддержанию постоянного электрического тока.

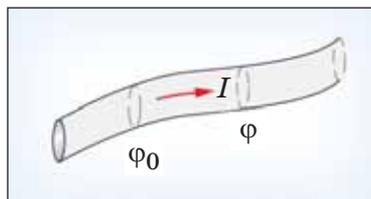


Рис. 96

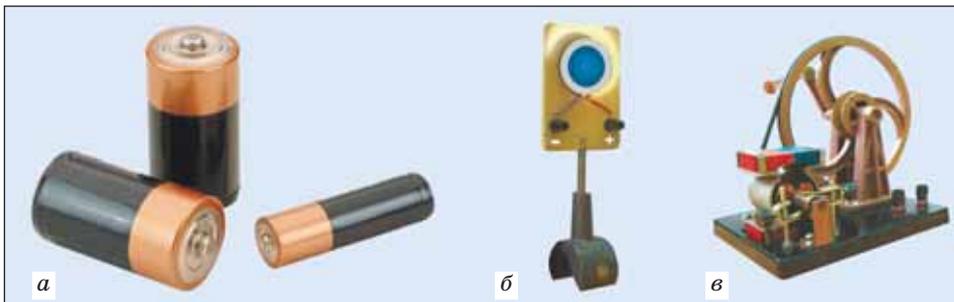


Рис. 97. Источники тока:

a – гальванический элемент;

б – фотоэлемент;

в – модель индукционного генератора.

Действие источников тока, как вам известно, может основываться на различных физических процессах (рис. 97). Это и гальванические элементы, где происходит разделение зарядов при протекании химических реакций. Это и фотоэлементы, где происходит преобразование световой энергии в электрическую. Это и электрические генераторы, где при вращении проволочной рамки-обмотки на заряженные частицы действует сила со стороны магнитного поля.

Силы любой природы, действующие на заряженные частицы в источниках тока (за исключением силы со стороны электрического поля), называют **сторонними силами**. Именно благодаря сторонним силам поддерживается постоянный ток в замкнутой цепи.

Действие сторонних сил на заряженные частицы в источниках тока характеризуют величиной, называемой электродвижущей силой, сокращённо ЭДС. Обозначают электродвижущую силу символом \mathcal{E} .

Электродвижущая сила источника тока равна отношению работы сторонних сил при перемещении заряда по замкнутой цепи к величине этого заряда.

$$\mathcal{E} = \frac{A_{cm}}{q}, \quad (20.2)$$

где A_{cm} – работа сторонних сил в источнике тока;
 q – заряд, перемещённый по цепи.

Единица измерения ЭДС – вольт.

$$1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}.$$



20.3. Какие ещё физические величины помимо ЭДС измеряются в вольтах?

Следует отметить, что термин «ЭДС» не является вполне удачным. Ведь, как следует из определения электродвижущей силы, эта величина характеризует не силовое, а энергетическое действие сторонних сил, их «работоспособность».



20.4. На корпусе гальванического элемента указано значение ЭДС 1,5 В. Какая работа будет совершена сторонними силами при прохождении по элементу электрического заряда 200 Кл?

Закон Ома для полной цепи. Рассмотрим полную, то есть содержащую источник тока, замкнутую электрическую цепь (рис. 98).

Пусть резистор, включённый во внешнюю электрическую цепь, имеет сопротивление R . Помимо резистора и источника тока обладает некоторым электрическим сопротивлением.

В гальванических элементах, например в аккумуляторах, это сопротивление раствора электролита, в фотоэлементах – сопротивление полупроводника, в генераторах – сопротивление обмотки. Обозначим сопротивление источника тока как r и будем называть это *внутренним сопротивлением*.

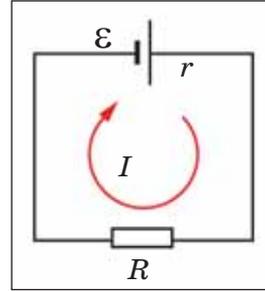


Рис. 98

? 20.5. Влияют ли сопротивление резистора R и внутреннее сопротивление r на величину тока в цепи? Попробуйте обосновать ваш ответ.

? 20.6. Влияет ли величина ЭДС на величину тока в цепи? Попробуйте обосновать ваш ответ.

Установим *зависимость между ЭДС \mathcal{E} , сопротивлением электрической цепи $R + r$ и силой тока I* (закон Ома для полной цепи).

Пусть при замыкании цепи возникает ток силой I . При прохождении тока в цепи на внешнем сопротивлении R и внутреннем сопротивлении r выделяется некоторое количество теплоты Q .

? 20.7. Как формулируется закон Джоуля и Ленца?

Это количество теплоты Q равно

$$Q = I^2 R \Delta t + I^2 r \Delta t. \quad (20.3)$$

Выделение тепловой энергии происходит благодаря совершению работы A_{cm} сторонними силами в источнике тока.

? 20.8. Как рассчитать работу сторонних сил исходя из определения электродвижущей силы [формула (20.2)]?

$$A_{cm} = \mathcal{E} \Delta q.$$

? 20.9. Как рассчитать заряд, прошедший по электрической цепи, исходя из определения силы тока [формула (18.1)]?

$$\Delta q = I \Delta t.$$

Тогда

$$A_{cm} = \mathcal{E} I \Delta t. \quad (20.4)$$

В соответствии с законом сохранения энергии выделяющееся в цепи количество теплоты равно работе сторонних сил.

$$Q = A_{cm}.$$

Или с учётом соотношений (20.3) и (20.4) имеем

$$\begin{aligned} I^2 R \Delta t + I^2 r \Delta t &= \mathcal{E} I \Delta t, \\ IR + Ir &= \mathcal{E}. \end{aligned}$$

Отсюда

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}. \quad (20.5)$$

Формула (20.5) и является математическим выражением закона Ома для полной цепи.

Сила тока в полной цепи равна отношению ЭДС источника тока к полному сопротивлению цепи.

Лабораторная работа «Проверка закона Ома для полной цепи».

Оборудование: источник тока, амперметр, вольтметр, резистор 2 Ом, реостат, соединительные провода, ключ.

В соответствии с законом Ома для полной цепи сила тока I определяется ЭДС источника тока \mathcal{E} и сопротивлением цепи $R + r$, где R – сопротивление внешней цепи; r – внутреннее сопротивление.

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}.$$

Преобразуем данное выражение:

$$\frac{1}{I} = \frac{R+r}{\mathcal{E}},$$

или

$$\frac{1}{I} = \frac{1}{\mathcal{E}} \cdot R + \frac{r}{\mathcal{E}}. \quad (20.6)$$

При изучении электрической цепи, в которую включён определённый источник тока, ЭДС источника \mathcal{E} и его внутреннее сопротивление r являются постоянными величинами. Сила тока I , как и величина, равная обратному значению силы тока $\frac{1}{I}$, зависит от сопротивления внешней цепи R . Следовательно, если закон Ома для полной цепи справедлив, то зависимость $\frac{1}{I} = f(R)$ должна являться линейной функцией.



20.10. Что является графиком линейной зависимости?

Построение графика $\frac{1}{I} = f(R)$ и его анализ позволяют сделать вывод о справедливости закона Ома для полной цепи.

Указания к работе:



Задание 1. Проверка закона Ома для полной цепи.

1. Соберите электрическую цепь, схема которой изображена на рисунке 99.

2. Регулируя ток в цепи реостатом, измерьте силу тока в цепи и напряжение на участке цепи, содержащем резистор и реостат.

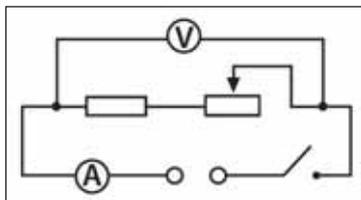


Рис. 99

Полученные данные занесите в таблицу.

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7
Напряжение U , В							
Сила тока I , А							
Сопротивление внешней цепи R , Ом							
Величина, обратная значению силы тока $1/I$, $1/A$							



20.11. Как формулируется закон Ома для участка цепи?

3. Используя математическое выражение закона Ома для участка цепи $I = U/R$, вычислите сопротивление внешней цепи R для каждого из опытов. Данные занесите в таблицу.

4. Вычислите для каждого из опытов значение величины, обратной силе тока $1/I$. Данные занесите в таблицу.

5. Постройте график зависимости

$$\frac{1}{I} = f(R).$$

Сделайте вывод, выполняется ли закон Ома для полной цепи.



Задание 2. Определение внутреннего сопротивления источника тока.

Если построенный вами при выполнении задания 1 график зависимости

$$\frac{1}{I} = f(R)$$

является графиком линейной функции, то используйте этот график для определения внутреннего сопротивления источника тока r . (Подсказка. Продолжите график до его пересечения с горизонтальной осью R . В точке пересечения графика с осью R значение $1/I$ равно 0.)

Сторонние силы, ЭДС, $\mathcal{E} = \frac{A_{em}}{q}$, закон Ома для полной цепи, $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$.

20.1 ● В эпиграфе к § 20 приведена формула

$$X = \frac{a}{b+x}.$$

Что в современном понимании обозначают величины X , x , a , b , указанные в данной формуле?

20.2 ● При включении источника тока, имеющего ЭДС 4,5 В, сила тока в электрической цепи оказалась равна 2 А. Какую работу при этом совершают сторонние силы в источнике за 0,5 мин?

20.3 ● Чему равна сила тока в цепи, схема которой изображена на рисунке 98, если ЭДС источника 6 В, внутреннее сопротивление источника 1 Ом, а сопротивление резистора 11 Ом?

20.4 ● Определите силу тока короткого замыкания для аккумулятора с ЭДС 12 В и внутренним сопротивлением 0,02 Ом. (Подсказка. Короткое замыкание – это ситуация, при которой внешняя электрическая цепь имеет крайне малое сопротивление.)

20.5 ● К батарейке с ЭДС 1,2 В и внутренним сопротивлением 0,2 Ом подключили резистор сопротивлением 4,6 Ом. Какая мощность выделяется при этом во внешней цепи? Какая мощность выделяется внутри источника тока?

§ 21. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС И ВНУТРЕННЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА ТОКА»



Открытие Ома, давшее впервые возможность количественно рассмотреть явления электрического тока, имело и имеет огромное значение для науки...

*Энциклопедический словарь
Брокгауза и Ефрона, с. 941*

Вам уже известен закон Ома для полной цепи.

Примеры решения задач.

Задача 1. Вольтметр подключён к полюсам источника тока (рис. 100). Какое значение напряжения покажет вольтметр?

Решение:

Запишем формулу закона Ома для полной цепи.

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r},$$

где R – сопротивление внешней цепи, равное сопротивлению вольтметра.

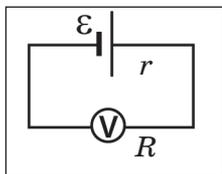


Рис. 100

Отсюда

$$\varepsilon = IR + Ir.$$

Как правило, сопротивление вольтметра во много раз больше внутреннего сопротивления источника тока (например, сопротивление школьного лабораторного вольтметра 700 Ом, а внутреннее сопротивление лабораторного источника питания менее 1 Ом).

В этом случае

$$IR \gg Ir$$

и

$$\varepsilon \approx IR. \quad (21.1)$$

В соответствии с законом Ома для участка цепи

$$I = \frac{U}{R},$$

где U – напряжение на участке цепи.

Именно значение этого напряжения и показывает вольтметр.

$$U = IR. \quad (21.2)$$

Сравнивая соотношения (21.1) и (21.2), мы видим, что

$$\varepsilon \approx U.$$

Таким образом, *вольтметр, подключённый к полюсам источника тока, показывает значение напряжения, практически равное ЭДС источника тока*.

Задача 2. При каком соотношении между внутренним сопротивлением источника тока r и сопротивлением внешней цепи R во внешней цепи будет выделяться наибольшая мощность?

Решение:

Если сопротивление внешней цепи будет крайне мало (сопротивление стремится к нулю: $R \rightarrow 0$), то энергия будет выделяться не во внешней цепи, а внутри источника тока (мощность P внешней цепи стремится к нулю: $P \rightarrow 0$).

Если сопротивление внешней цепи будет крайне велико (сопротивление цепи стремится к бесконечно большому значению: $R \rightarrow \infty$), то сила тока в цепи будет мала (мощность P внешней цепи стремится к нулю: $P \rightarrow 0$).

Попробуем выполнить эскиз графика зависимости мощности P , выделяющейся во внешней цепи, от сопротивления внешней цепи R (рис. 101).

Действительно, если при малых значениях сопротивления источника и при больших значениях сопротивления внешней цепи мощность мала, то функция $P = f(R)$ с ростом значения аргумента – сопротивления R – должна первоначально возрастать, а затем уменьшаться.

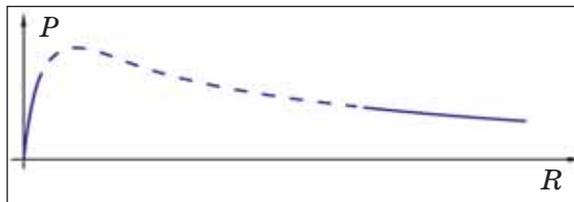


Рис. 101

Проведённый предварительный анализ показывает, что вопрос, поставленный в задаче, правомерен. Действительно, при некотором значении сопротивления внешней цепи R будет выделяться наибольшая мощность P .



21.1. Как рассчитывается электрическая мощность, выделяющаяся на участке цепи?

Как вам известно, мощность P , выделяющаяся на участке цепи, определяется напряжением на этом участке и силой тока:

$$P = UI.$$

Воспользуемся соотношением (21.2).

Тогда мощность равна

$$P = I^2 R.$$

Силу тока определим по закону Ома для полной цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}.$$

Таким образом,

$$P = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R+r)^2}. \quad (21.3)$$

Рассмотрим частный случай. Пусть, к примеру, ЭДС источника тока 12 В, а его внутреннее сопротивление 4 Ом.

$$\mathcal{E} = 12 \text{ В},$$

$$r = 4 \text{ Ом}.$$

Воспользуемся формулой (21.3) и проведём расчёт мощности P , выделяющейся во внешней цепи при различных значениях сопротивления внешней цепи R . Результаты расчётов приведены в таблице.

R , Ом	0	1	2	3	4	5	6	7	8
P , Вт	0	5,8	8,0	8,8	9,0	8,9	8,6	8,3	8,0

Как видим, *максимальная мощность выделяется источником тока во внешней цепи, когда сопротивление внешней цепи равно внутреннему сопротивлению источника тока.*

P максимальна, если $R = r$.

Докажем это утверждение математически строго. Преобразуем выражение (21.3)

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

$$P = \frac{\mathcal{E}^2 R}{R^2 + 2Rr + r^2},$$

$$P = \frac{\varepsilon^2 R}{R^2 - 2Rr + r^2 + 4Rr},$$

$$P = \frac{\varepsilon^2 R}{(R - r)^2 + 4Rr},$$

$$P = \frac{\varepsilon^2}{\frac{(R - r)^2 + 4Rr}{R}},$$

$$P = \frac{\varepsilon^2}{\frac{(R - r)^2}{R} + 4r}. \quad (21.4)$$

Проанализируем выражение (21.4). Мощность P достигает максимального значения тогда, когда знаменатель дроби

$$\frac{(R - r)^2}{R} + 4r$$

минимален. Знаменатель же минимален в случае, если выражение в скобках $(R - r)$ равно нулю, то есть при условии

$$R = r.$$

Обозначим максимальную мощность как $P_{\text{макс}}$.

$$P_{\text{макс}} = \frac{\varepsilon^2}{4r}.$$

Например, если $\varepsilon = 12$ В, $r = 4$ Ом, то $P_{\text{макс}} = 9$ Вт.



Задача 3. Конденсатор ёмкостью $C = 58$ мкФ и резистор сопротивлением $R = 30$ Ом, соединённые последовательно, подключили к источнику тока с ЭДС $\varepsilon = 100$ В и малым внутренним сопротивлением (рис. 102). Какое количество теплоты выделится на резисторе при зарядке конденсатора?

Решение:

При замыкании ключа в цепи, схема которой изображена на рисунке 102, в течение некоторого времени будет проходить процесс зарядки конденсатора, по цепи будет протекать ток и по этой причине на резисторе выделится некоторое количество теплоты Q .

Однако это количество теплоты нельзя рассчитать по закону Джоуля и Ленца, так как при зарядке конденсатора ток в цепи не является постоянным.

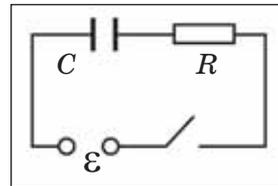


Рис. 102

Для расчёта количества теплоты воспользуемся законом сохранения энергии. Если при перемещении заряда сторонними силами в источнике тока совершается работа A_{cm} и в конденсаторе накапливается энергия электрического поля W , то количество теплоты Q , выделившееся в резисторе, будет равно

$$Q = A_{cm} - W. \quad (21.5)$$

Работа сторонних сил A_{cm} определяется значением ЭДС \mathcal{E} и зарядом q , прошедшим по цепи [соотношение (20.2)].

$$A_{cm} = \mathcal{E}q. \quad (21.6)$$

Энергия электрического поля конденсатора W определяется ёмкостью C конденсатора и напряжением U , до которого заряжен конденсатор [соотношение (17.10)].

$$W = \frac{CU^2}{2}.$$

До какого значения напряжения будет заряжен конденсатор? Очевидно (смотрите решение задачи 1 на с. 174–175), что

$$U = \mathcal{E}.$$

Тогда

$$W = \frac{C\mathcal{E}^2}{2}. \quad (21.7)$$

Из соотношений (21.5) – (21.7) имеем

$$Q = \mathcal{E}q - \frac{C\mathcal{E}^2}{2}. \quad (21.8)$$



21.2. Как определяется ёмкость?

Рассчитаем заряд, прошедший по цепи.

$$C = \frac{q}{U},$$

отсюда

$$q = CU,$$

но

$$U = \mathcal{E},$$

тогда

$$q = C\mathcal{E}.$$

Таким образом, соотношение (21.8) примет вид

$$Q = C\mathcal{E}^2 - \frac{C\mathcal{E}^2}{2},$$

$$Q = \frac{C\mathcal{E}^2}{2},$$

$$Q = \frac{5,8 \cdot 10^{-5} \text{ Ф} \cdot (100 \text{ В})^2}{2} = 0,29 \text{ Дж}.$$

Действия с единицами измерений:

$$\Phi \cdot B^2 = \frac{\text{Кл}}{\text{В}} \cdot \left(\frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}\right)^2 = \frac{\text{Кл} \cdot \text{Дж}^2}{\text{В} \cdot \text{Кл}^2} = \frac{\text{Дж}^2}{\text{В} \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{Дж}^2}{\frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{Дж}^2}{\text{Дж}} = \text{Дж}.$$

Ответ: $Q = 0,29$ Дж.

Обратите внимание, что ответ, полученный нами при решении задачи, не зависит от величины сопротивления резистора, на котором происходит выделение энергии. Это можно понять из следующих соображений:

– если сопротивление резистора велико, то в цепи, очевидно, возникает маленький ток и требуется некоторое время для зарядки конденсатора, который должен получить заряд q , равный

$$q = C\varepsilon,$$

– если сопротивление резистора мало, то первоначально в цепи возникает большой ток, но существовать он будет малое время – накопление конденсатором заряда произойдёт быстрее.

В итоге в цепи выделится одинаковое количество теплоты.

Лабораторная работа «Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока».

Оборудование: источник тока, амперметр, вольтметр, резистор 2 Ом, реостат, ключ, соединительные провода.



Задание 1. Измерение ЭДС источника тока.

Подключите вольтметр к полюсам источника тока и измерьте значение ЭДС источника ε .



Задание 2. Определение внутреннего сопротивления источника тока.

Соберите электрическую цепь, схема которой изображена на рисунке 99.

Измерьте силу тока I и напряжение U . Из закона Ома для полной цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

выразим ЭДС:

$$\varepsilon = IR + Ir.$$

Из закона Ома для участка цепи следует, что

$$U = IR.$$

Таким образом,

$$\varepsilon = U + Ir. \quad (21.9)$$

Отсюда

$$r = \frac{\varepsilon - U}{I}.$$

Вычислите, чему равно внутреннее сопротивление.

Измените положение скользящего контакта реостата, вновь измерьте силу тока и напряжение. Повторно проведите вычисление внутреннего сопротивления и сравните полученные результаты.



Задание 3. Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока методом двух измерений.

Используя прежнюю электрическую цепь (рис. 99), проведите измерения силы тока и напряжения дважды при различных положениях скользящего контакта реостата. Данные занесите в таблицу:

Номер опыта	1	2
Сила тока I , А		
Напряжение U , В		
Внутреннее сопротивление r , Ом		
Электродвижущая сила \mathcal{E} , В		

Дважды запишите уравнение (21.9), получив систему уравнений

$$\begin{cases} \mathcal{E} = U_1 + I_1 r, \\ \mathcal{E} = U_2 + I_2 r. \end{cases}$$

Решив эту систему уравнений, определите ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока.

Сравните результаты с результатами, полученными при выполнении заданий 1 и 2.

21.1 ● ЭДС источника 4,5 В, его внутреннее сопротивление 0,5 Ом (рис. 99). Каковы показания амперметра и вольтметра, если сопротивление внешней цепи 4 Ом? Как изменятся показания приборов при смещении подвижного контакта реостата влево? Ответ обосновать.

21.2 ● Как изменятся показания амперметра и вольтметра в цепи, схема которой изображена на рисунке 103, если одну из ламп выкрутить? Ответ обосновать.

21.3 ● При подключении к источнику тока резистора сопротивлением 11 Ом сила тока в цепи составила 1 А, а при замене резистора на резистор сопротивлением 5 Ом сила тока в цепи возросла до 2 А. Определите сопротивление источника тока.

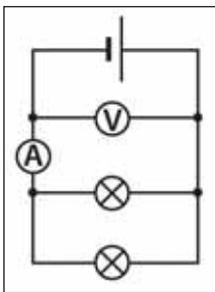


Рис. 103

21.4 ● Цепь содержит источник с ЭДС 6 В и внутренним сопротивлением 0,3 Ом. Постройте графики зависимости силы тока и напряжения на полюсах источника от сопротивления внешнего участка.

21.5 ● От генератора с ЭДС 50 В и внутренним сопротивлением 0,05 Ом ток поступает по толстому медному кабелю к месту электросварки, удалённому от генератора на незначительное расстояние. Определите напряжение на сварочном аппарате, если сила тока в цепи составляет 250 А. Какова мощность сварочной дуги?

§ 22. ТОК ЧЕРЕЗ ВАКУУМ



Электрoвакуумные приборы (ЭВП) – электронные приборы, в которых рабочее пространство освобождено от воздуха... Работа ЭВП основана на взаимодействии потока электронов, испускаемых катодом, с постоянными и переменными электрическими и магнитными полями.

Энциклопедический словарь «Электроника»

Вам уже известен принцип действия электронно-лучевой трубки (ЭЛТ).

Термоэлектронная эмиссия. Как вам известно, вакуум – это состояние крайне разреженного газа, давление которого в сотни тысяч, миллионы раз меньше атмосферного давления. Принято характеризовать «качество вакуума», сравнивая среднюю длину свободного (бесстолкновительного) пробега λ , совершаемого молекулами газа, с размером сосуда d , в котором находится газ. Если $\lambda \approx d$ – это средний вакуум, если $\lambda \gg d$ – высокий вакуум (рис. 104, а, б).

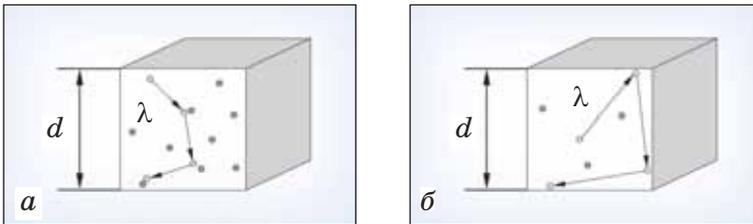


Рис. 104

Для того чтобы через вакуум шёл ток, существовало упорядоченное движение заряженных частиц, дополнительно необходим источник заряженных частиц. Обычно таким источником является раскалённая металлическая спираль. При пропускании тока через металл выделяется определённое количество теплоты, температура металла увеличивается. При этом энергия теплового движения электронов в металле возрастает настолько, что часть электронов может испариться, с поверхности металлов происходит *термоэлектронная эмиссия*¹.

¹ От латинского *emissio* – испускание, излучение.

Термоэлектронная эмиссия – испускание электронов нагретыми телами в вакуум (или другую среду).

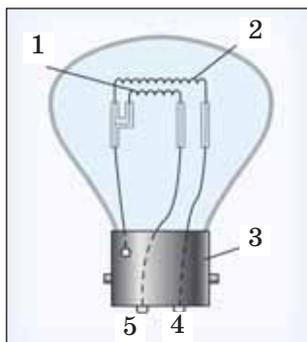


Рис. 105

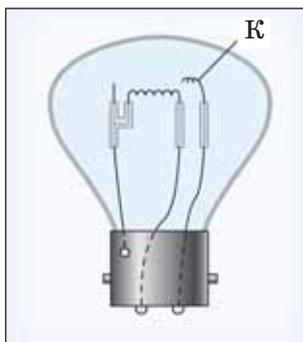


Рис. 106

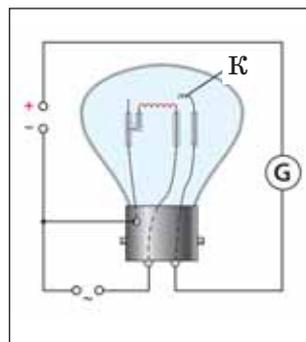


Рис. 107

Рассмотрим устройство лампы накаливания, которая ранее повсеместно устанавливалась в фары автомобиля для создания так называемого «ближнего» и «дальнего» света. Лампа имеет две нити накала (рис. 105). Один конец каждой из нитей накала 1 и 2 имеет контакт с металлическим цоколем 3 лампы. Другие концы нитей подведены к отдельным контактам 4 и 5 соответственно.

Подадим на нить накала 2 лампы (цоколь – контакт 4) напряжение больше 12 В и добьёмся того, чтобы спираль 2 перегорела. Тогда лампа превратится в лампу с одной нитью накала 1 и отдельным изолированным контактом К (рис. 106).

Включим «испорченную» лампу в электрическую цепь (рис. 107). Подадим напряжение между спиралью и контактом К так, чтобы на контакт приходился положительный потенциал. Стрелка гальванометра G находится на нуле, тока в цепи нет. Но как только мы подадим напряжение и на нить накала лампы так, чтобы нить накала была раскалена, гальванометр фиксирует ток.



22.1. Как объяснить наблюдаемое явление? Почему сила тока увеличивается при увеличении накала спирали?

Возникновение тока обусловлено явлением термоэлектронной эмиссии. С раскалённой нити накала испаряются электроны; электрическое поле, существующее между спиралью и контактом К, создаёт их упорядоченное движение от спирали к контакту К. Так возникает ток через вакуум.



22.2. Будет ли существовать ток в лампе, если на контакт К будет подан не положительный, а отрицательный потенциал?

Электровacuумные приборы. Практически вся первая половина XIX века была временем стремительного развития электровacuумной техники. Были изобретены различные типы электронных ламп, что позволило создать новые отрасли электро- и радиотехники, осуществить радиотелефонную связь, телевидение. Была построена первая электронно-вычислительная машина, которая содержала 18 000 электронных ламп и выполняла 5000 операций сложения в секунду.

В дальнейшем электровacuумные приборы были вытеснены полупроводниковыми устройствами, для работы которых не нужно тратить энергию на нагрев нитей накаливания, как в электронных лампах. Также полупроводниковые устройства более миниатюрны в сравнении с ламповой техникой.

Однако в некоторых случаях электровacuумные приборы незаменимы. В мощных радиопередатчиках и приёмниках (радиолокация, космические средства связи) по-прежнему используются электровacuумные приборы.

Используются электровacuумные устройства *магнетроны* и в таких современных бытовых приборах, как микроволновые печи. Магнетрон – мощная электронная лампа, излучающая электромагнитные волны в результате взаимодействия потока электронов с магнитным полем, созданным внешним электромагнитом. Частота электромагнитного излучения магнетронов, используемых в микроволновых печах, составляет 2450 МГц.

Такая частота выбрана не случайно. Практически во всех продуктах содержится вода. Молекулы воды (H_2O), находящейся в жидком состоянии, образно можно представить как заряженные «гантельки» (рис. 108, а, б). В электрическом поле эти молекулы-«гантельки» ориентируются (поворачиваются) по направлению силовых линий электрического поля.

Но если поле переменное, то молекулы вынуждены постоянно переориентироваться, разворачиваясь в противоположном направлении за половину периода колебаний электрического поля. При выбранной частоте (2450 МГц) повороты молекул воды происходят наиболее успешно – молекулы успевают совершить поворот. Совершая повороты 4 900 000 раз в секунду, молекулы воды сталкиваются с другими молекулами, увеличивая тем самым их энергию теплового движения.

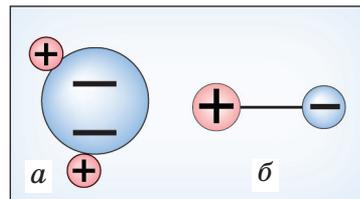


Рис. 108



22.3. Как связана температура со средней энергией теплового движения молекул вещества?

По этой причине температура продуктов под воздействием электромагнитного излучения повышается и пицца разогревается в микроволновой печи.

Ещё один распространённый электровакуумный прибор, в котором использовано явление термоэлектронной эмиссии, — это электронно-лучевая трубка (рис. 109).

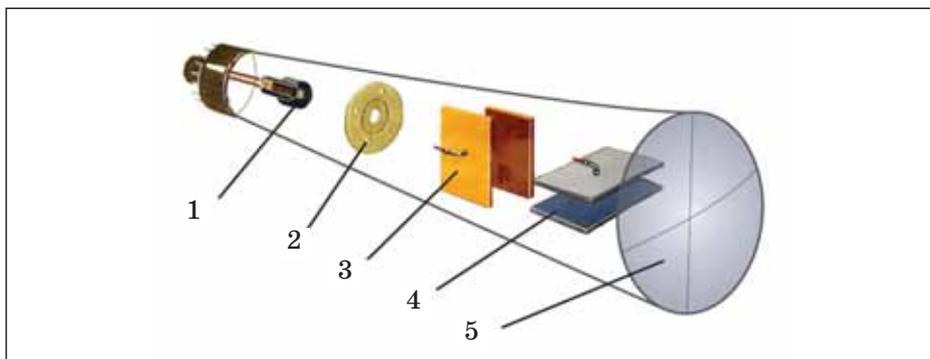


Рис. 109

1 – катод электронной пушки. Покрит оксидным слоем – окислами щёлочно-земельных металлов (BaO , CaO , SrO). Этим обеспечивается достаточная эмиссия электронов при относительно невысокой температуре (около 800°C);

2 – анод электронной пушки. Практически электронно-лучевая трубка имеет несколько анодов, расположение которых и потенциал на них подбираются таким образом, чтобы обеспечить формирование электронного луча – узкого пучка ускоренных электронов;

3 – горизонтально отклоняющие пластины;

4 – вертикально отклоняющие пластины;

5 – экран. Изнутри покрыт специальным веществом – люминофором, которое светится под воздействием электронов, ударяющих в экран.



22.4. Как осуществляется управление электронным лучом в электронно-лучевой трубке?



22.5. Где находят применение электронно-лучевые трубки?

Вакуум, термоэлектронная эмиссия, магнетрон, микроволновая печь, электронно-лучевая трубка.

22.1 ● В декабре 1884 года в одном из американских журналов была помещена небольшая заметка под названием «Явление в лампочке Эдисона», в которой говорилось:

«В отделе Эдисона на выставке в Филадельфии демонстрировалось следующее интересное явление.

В лампочке накаливания Эдисона под угольной нитью на равном расстоянии от её концов помещался изолированный электрод, состоящий из полоски платины...

Когда при зажигании лампы между электродом и одним концом нити включался гальванометр, то он показывал ток... Это указывало на то, что внутри лампы через вакуум проходил ток.

При включении гальванометра к положительному полюсу нити этот ток увеличивался во много раз.

Ток, отмечаемый гальванометром, возрастал также и при увеличении тока накала лампы».

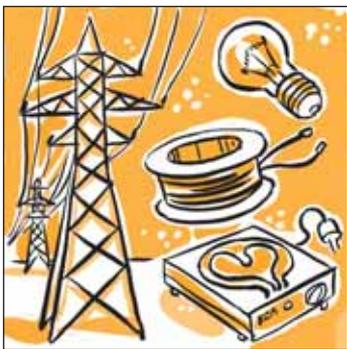
Какое физическое явление описано в данной заметке? В чём заключается явление?

22.2 ● Анодное напряжение в электронно-лучевой трубке составляет 3 кВ. С какой скоростью электрон подходит к аноду? (Считать, что начальная скорость электронов равна нулю.) Какова мощность тока электронного луча, если сила тока составляет 150 мкА?



22.3. Ознакомьтесь с инструкцией к микроволновой печи. Какова длина волны излучения, создаваемого магнетроном печи?

§ 23. ТОК В МЕТАЛЛАХ



Наука идёт вперёд на двух ногах – теории и эксперименте. Иногда вперёд выдвигается одна нога, иногда другая, но неуклонный прогресс достигается лишь тогда, когда обе шагают одинаково.

*Роберт Эндрус Милликен (1868–1953),
известный американский физик,
лауреат Нобелевской премии*

Вам уже известно, что ток в металлах – это упорядоченное движение свободных электронов.

Природа тока в металлах. Вспомните: как правило, каждый из металлов можно охарактеризовать температурой плавления (смотрите таблицу 10).

**Таблица 10. Температура плавления некоторых металлов, °С
(при нормальном атмосферном давлении)**

Алюминий	660	Олово	232
Вольфрам	3387	Платина	1772
Железо	1535	Свинец	327
Золото	1064	Серебро	962
Медь	1085	Цинк	420



23.1. О каких характерных особенностях внутреннего строения металлов (в твёрдом состоянии) свидетельствует наличие определённой температуры перехода металлов из твёрдого в жидкое состояние?

Существование определённой температуры плавления подтверждает *кристаллическое строение* металлов. Остов (основа) кристаллической решётки металлов – положительно заряженные ионы, между которыми находятся валентные электроны, свободно движущиеся в кристаллической решётке (электронный газ). При этом силы кулоновского притяжения «ион—электроны» уравнивают силы отталкивания «ион—ионы», что определяет механические свойства металлов – их прочность, упругость. Большое же количество подвижных электронов обеспечивает высокую тепло- и электропроводность металлов.

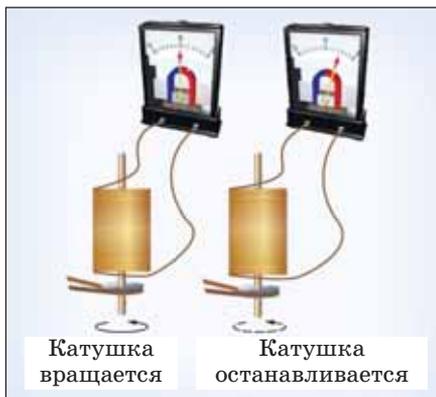


Рис. 110

Доказательства электронной природы тока в металлах были получены учёными в 1913–1916 годах.

В опытах (рис. 110) использовались инерционные свойства свободных электронов. На катушку наматывалась медная, алюминиевая или серебряная проволока. При равномерном вращении катушки гальванометр не показывал ток¹. При резком торможении катушки возникал ток.

Направление «тормозного тока» показало, что ток в металлах создаётся именно движением отрицательно заряженных частиц.

¹ При вращении катушки в магнитном поле Земли должен был бы возникать индукционный ток. Чтобы этого не происходило, при проведении опытов магнитное поле Земли компенсировали магнитным полем, создаваемым специальными электромагнитами, расположенными вокруг катушки.

Была также измерена величина заряда, прошедшего через гальванометр при торможении катушки. Это позволило определить отношение заряда к массе для частиц, являющихся носителями заряда в металлах. Оно оказалось близким к отношению величины заряда к массе для электрона.



23.2. Величина заряда электрона равна $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, масса электрона $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. Чему равно отношение заряда электрона к его массе?

Экспериментально доказано, что ток в металлах – это упорядоченное движение электронов.



Вывод закона Ома для участка цепи. Для поддержания электрического тока в металлах необходимо создать в проводнике с помощью источника тока электрическое поле. Тогда электрическое поле действует определённой силой на электроны в одном направлении и возникает упорядоченное движение электронов.

Пусть электрон в течение времени t ускоряется под действием электрического поля, затем взаимодействует с кристаллической решёткой, передавая ей накопленный импульс и энергию, вновь ускоряется в течение времени t и так далее.

При равноускоренном движении электрон за время t приобретёт скорость v , равную

$$v = at,$$

где a – ускорение, с которым движется электрон. Тогда средняя скорость дрейфа электронов \bar{v} равна

$$\bar{v} = \frac{at}{2}.$$

В соответствии со вторым законом Ньютона¹

$$a = \frac{F}{m},$$

где F – сила, действующая на электрон;

m – масса электрона.

$$\bar{v} = \frac{Ft}{2m}.$$

Сила F , действующая на электрон, определяется напряжённостью электрического поля внутри проводника E и зарядом частицы e :

$$F = E \cdot e.$$

Следовательно,

$$\bar{v} = \frac{Eet}{2m}.$$

¹ Приведённый далее вывод не является строгим, так как описать движение электрона с помощью законов Ньютона (законов классической физики) можно только приближённо.

Напряжённость электрического поля E зависит от разности потенциалов (напряжения) U , приложенной к проводнику, и длины проводника l [смотрите соотношение (14.13)]:

$$E = \frac{U}{l}.$$

Таким образом, выражение для средней скорости дрейфа электронов в проводнике, происходящее под действием электрического поля, примет вид

$$\bar{v} = \frac{et}{2ml} U. \quad (23.1)$$

В соответствии с соотношением (18.5) чем больше скорость дрейфа электронов, тем больше сила тока в цепи:

$$I = q_0 n s \bar{v},$$

где n – концентрация свободных электронов в металле;

s – площадь поперечного сечения проводника;

q_0 – заряд частицы, движущейся в проводнике, в данном случае $q_0 = e$.

С учётом выражения (23.1) имеем

$$I = \frac{e^2 n t s}{2ml} \cdot U.$$

Таким образом, теоретически обоснован закон Ома для участка цепи: сила тока в участке цепи прямо пропорциональна разности потенциалов (напряжению) на концах этого участка.

$$I \sim U.$$

Зависимость удельного сопротивления металлов от температуры.

Проведём следующий опыт. Включим в электрическую цепь лампу накаливания (рис. 111). Подадим на лампу напряжение 6 В, сила тока в нити накаливания лампы составит 1,3 А. Увеличим напряжение на лампе в 2 раза, до 12 В. В соответствии с законом Ома для участка цепи и сила тока должна увеличиться в 2 раза, до 2,6 А. Однако амперметр показывает, что сила тока в нити накаливания лампы составляет всего 1,8 А.

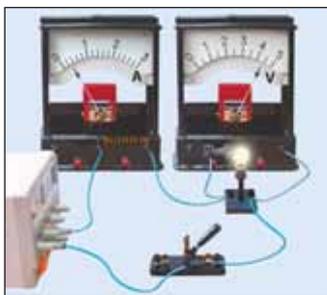


Рис. 111



23.3. Почему в опыте мы наблюдаем «нарушение» закона Ома для участка цепи?

Сила тока в нити накаливания лампы равна

$$I = \frac{U}{R},$$

где R – сопротивление лампы. Если при увеличении напряжения сила тока увеличивается «меньше нормы», то это свидетельствует об увеличении сопротивления лампы. При увеличении напряжения на лампе сила тока возрастает, нить лампы накаляется и её сопротивление увеличивается.

Вспомним, что сопротивление проводника зависит от удельного сопротивления проводника ρ , из которого изготовлен проводник:

$$R = \rho \frac{l}{s},$$

где l – длина проводника;

s – площадь его поперечного сечения.

Таким образом, можно сделать вывод, что удельное сопротивление металлов увеличивается с ростом их температуры.

Лабораторная работа «Снятие вольт-амперной характеристики лампы накаливания».

Оборудование: источник тока, амперметр, вольтметр, низковольтная лампа на подставке, реостат (50 Ом), ключ, соединительные провода.

Указания к работе:



Соберите электрическую цепь, подключив к источнику тока последовательно лампу и реостат. Включите в цепь амперметр и вольтметр так, чтобы вы имели возможность измерить силу тока в нити накаливания лампы и напряжение на лампе. Начертите схему собранной электрической цепи.

Регулируя реостатом ток в цепи, измерьте силу тока в лампе при различных значениях напряжения на ней. Данные занесите в таблицу.

Номер опыта	Напряжение на лампе U , В	Сила тока в нити накала I , А	Сопротивление нити накала лампы R , Ом	Цвет нити накала лампы
1				
2				
3				
4				

Постройте вольт-амперную характеристику лампы накаливания, то есть зависимость силы тока через лампу от приложенного к ней напряжения.

Вычислите сопротивление нити при различных значениях силы тока. Результаты вычислений также занесите в таблицу. Сделайте вывод, как меняется сопротивление нити накала лампы в зависимости от её температуры. (О температуре нити накала мы можем судить по цвету нити накала и яркости свечения лампы.)

При увеличении температуры ионы металла, колеблясь в узлах кристаллической решётки, совершают всё более интенсивное тепловое движение. Это уменьшает шансы движущихся по проводнику электронов «без проблем» – не взаимодействуя – миновать узел кристаллической решётки. Взаимодействие электронов с кристаллической решёткой снижает их среднюю скорость дрейфа, которую электроны приобретают под действием электрического поля. Это уменьшает силу тока в цепи, иными словами, при увеличении температуры металлов возрастает их удельное сопротивление. Так, например, сопротивление вольфрамовой нити лампы накаливания после включения, когда температура нити достигает $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$, увеличивается в 14 раз. У медного проводника, если его, вынув из льда, поместить в кипящую воду, сопротивление увеличится более чем на 40%.



Сверхпроводимость. В 1908 году нидерландским физиком Хейке Камерлинг-Оннесом был ожижен гелий (критическая температура гелия $-268\text{ }^{\circ}\text{C}$), и для исследователей впервые стали доступны температуры вблизи абсолютного нуля. В 1911 году им было открыто удивительное явление – явление сверхпроводимости. Он обнаружил, что при температуре $4,15\text{ K}$ электрическое сопротивление ртути становится равным нулю. В дальнейших исследованиях состояние сверхпроводимости было обнаружено и у многих других металлов и сплавов.

Если переменным магнитным полем возбудить индукционный ток в проводящем контуре (металлическом кольце), то в нормальном металле (при комнатной температуре) этот ток быстро затухает, и тем быстрее, чем больше сопротивление металла. Если же металл предварительно был охлаждён до сверхнизких температур и находится в сверхпроводящем состоянии, то созданный в кольце ток циркулирует неограниченно долго без затухания и выделения джоулева тепла.

Долгие десятилетия явление сверхпроводимости для физиков оставалось научной загадкой, и только в 1957 году была установлена физическая природа этого явления и на основе квантовой физики разработана теория сверхпроводимости.

В 1986 году были обнаружены материалы, у которых переход в сверхпроводящее состояние происходит при более высокой температуре. Это явление было названо физиками высокотемпературной сверхпроводимостью. Охлаждение таких веществ можно производить с помощью жидкого азота. Азот при атмосферном давлении кипит при температуре $-195,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, он доступен (в составе атмосферного воздуха около 80 % азота). По этой причине создание материалов с высокой температурой перехода в сверхпроводящее состояние и поиск путей их практического применения является важной научной задачей.

Уже в наше время область применения сверхпроводников простирается от магнитных систем ускорителей заряженных частиц, магнитных систем медицинских приборов-томографов до компьютерных технологий.

Электронная проводимость металлов, теоретическое обоснование закона Ома для участка цепи, **зависимость удельного сопротивления металлов от температуры**, сверхпроводимость, высокотемпературная сверхпроводимость.

23.1 ● Рядом с работающей электроплиткой с открытой спиралью включим вентилятор, обдувающий спираль потоком воздуха. Изменится ли сила тока в электроплитке? Ответ обосновать.

23.2 ● Если по металлическому проводнику проходит ток 3 А, то выделяется электрическая мощность 630 Вт. Если на этот же проводник подаётся напряжение 60 В, то выделяющаяся мощность составляет 72 Вт. Одинакова ли температура проводника в рассматриваемых случаях? Ответ подтвердите расчётом.

23.3 ● Оцените, чему равно среднее время между столкновениями электронов с кристаллической решёткой для меди при комнатной температуре. (Подсказка. Значение концентрации свободных электронов для меди приведено на странице 157 учебника.)

§ 24. ТОК В ГАЗАХ

Во время грозы на остановке общественного транспорта женщину ударила молния. Как пояснили в МЧС, потерпевшая раскрыла зонтик, и тут же в него попал разряд молнии.

Из сообщений СМИ

Вам уже известны различные виды газового разряда.



Газовый разряд. Пластины плоского конденсатора

подсоединили к электromетру и зарядили конденсатор (рис. 112, а). Продолжительное время стрелка электromетра будет отклонена от вертикали, «сигнализируя» нам о наличии неизменной разности потенциалов между обкладками конденсатора. Конденсатор не разряжается, ток между его обкладками не возникает – сухой чистый воздух является диэлектриком.

Если замкнуть пластины конденсатора металлическим проводником, то по проводнику пройдёт кратковременный ток, конденсатор разрядится, разность потенциалов станет равна нулю и стрелка электromетра займёт вертикальное положение (рис. 112, б).

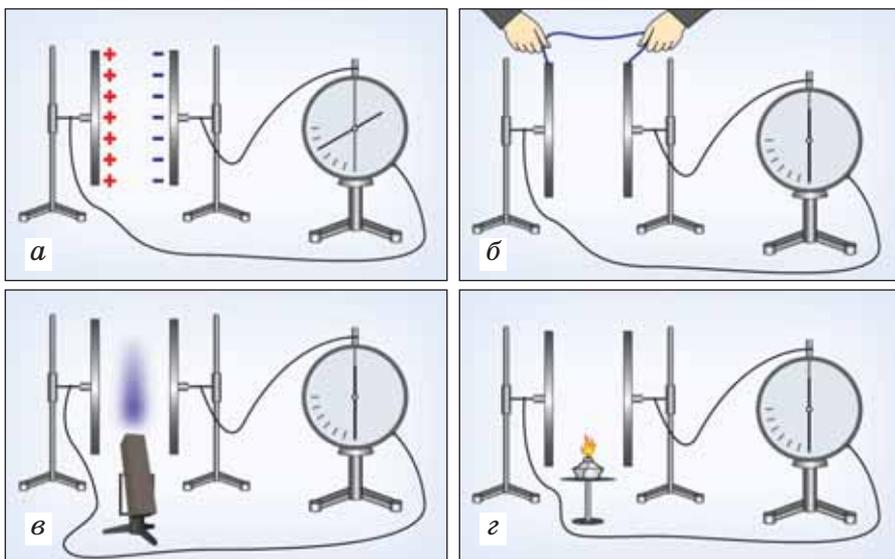


Рис. 112

Можно разрядить конденсатор и иным способом – достаточно осветить воздушный промежуток между пластинами конденсатора ультрафиолетовым излучением, воспользовавшись специальным источником ультрафиолетового излучения (рис. 112, *в*). Можно поместить между пластинами конденсатора зажжённую спичку или спиртовку (рис. 112, *г*).

Если конденсатор разрядится, значит, между его пластинами в воздухе протекает электрический ток. Электрический ток в газах называют газовым разрядом.



24.1. Как объяснить возникновение газового разряда при воздействии на воздушный промежуток ультрафиолетового излучения или при нагревании (рис. 112, *в*, *г*)?

Как вам известно, энергия кванта (порции) электромагнитного излучения E зависит от частоты излучения ν :

$$E = h\nu,$$

где h – постоянная Планка.

Частота ультрафиолетового излучения больше частоты видимого излучения. Поэтому энергии кванта ультрафиолетового излучения достаточно, чтобы вызвать ионизацию молекул, входящих в состав воздуха. При электризации появляются свободные электроны и ионы, что и обеспечивает проводимость при газовом разряде.

При нагревании воздуха, когда его температура значительно возрастает, энергия молекул велика. При столкновении таких молекул также происходит ионизация.

В рассмотренных нами случаях газовый разряд возникает при воздействии на газ некоторого *ионизатора*, и в его отсутствии газовый разряд не происходит и ток через газ отсутствует. Такой газовый разряд называют *несамостоятельным газовым разрядом*. Однако возможен и самостоятельный газовый разряд, который происходит и в отсутствии внешнего ионизатора. При этом носители заряда – электроны, положительные и отрицательные ионы – образуются в газах в результате различных физических процессов. По этой причине возможны разные виды самостоятельного газового разряда.

Виды самостоятельного газового разряда. Один из видов самостоятельного газового разряда – **дуговой разряд**, который возникает за счёт термоэлектронной эмиссии. Для того чтобы создать дуговой разряд, можно воспользоваться, например, двумя угольными стержнями, которые включены в цепь напряжением около 50 В (рис. 113). Ввиду шероховатости и неровности поверхностей угольных стержней они контактируют друг с другом только в отдельных точках.



24.2. Как формулируется закон Джоуля и Ленца?



Рис. 113



Рис. 114

Из-за большого сопротивления в области контакта угольных стержней выделяется значительное количество теплоты. Концы угольных стержней нагреваются до температуры в несколько тысяч градусов, и возникает термоэлектронная эмиссия. Если теперь угольные стержни отодвинуть друг от друга, то в воздушном зазоре между стержнями будет наблюдаться *электрическая дуга* – мощный источник света и тепла. С помощью электрической дуги проводят сварку металлов – и не только в воздухе, но и в воде, и даже в открытом космосе (рис. 114).

Название другого вида газового разряда – **искровой разряд** – говорит о том, что в этом случае речь идёт о кратковременном процессе. Длительность искрового разряда, как правило, составляет всего от нескольких микросекунд до нескольких сотен микросекунд. Этот вид разряда наблюдается тогда, когда мощность источника тока недостаточна для поддержания постоянного процесса протекания тока в газе.

Основной механизм возникновения свободных носителей заряда при искровом разряде – ионизация электронным ударом и возникновение электронных лавин.

Ионизация электронным ударом – потеря атомом электрона – при ударе в атом энергичного свободного электрона возможна тогда, когда кинетическая энергия свободного электрона E_k превосходит работу, необходимую для ионизации атома A_u .

$$E_k \geq A_u. \quad (24.1)$$

Кинетическая энергия свободного электрона приобретает им под действием электрического поля, которое, ускоряя частицу, совершает работу.

$$E_{\kappa} = A, \quad (24.2)$$

где A – работа электрического поля, совершаемая полем при перемещении частицы.

Если поле однородно, то работа электрического поля A определяется выражением (14.12):

$$A = Eqd, \quad (24.3)$$

где E – напряжённость электрического поля;

q – заряд частицы;

d – расстояние, которое проходит электрон от одного столкновения до другого (длина свободного пробега).

Из соотношений (24.2), (24.3) следует условие осуществления ударной ионизации:

$$Eqd \geq A_u. \quad (24.4)$$

При выполнении условия ударной ионизации сценарий искрового разряда таков. Как только в газе появляется свободный электрон (например, за счёт световой или тепловой ионизации), он под действием электрического поля ускоряется и при соударении с атомом (или молекулой) газа ионизирует его. В результате возникают два свободных электрона, которые, ускоряясь, ионизируют газ. Возникают четыре, затем восемь, шестнадцать электронов. Процесс ионизации нарастает лавинообразно – возникает *электронная лавина*. В газе возникают «каналы», наполненные ионизированным проводящим газом. Объединение этих каналов позволяет пройти току через слой газа – проходит искровой разряд.



24.3. Почему искровой разряд сопровождается звуковыми эффектами («треск искры», гром при возникновении молнии)?

Объединение ионизированных проводящих каналов приводит к резкому уменьшению сопротивления и, как следствие, к уменьшению напряжения на искровом промежутке (вспомните закон Ома для участка цепи). По этой причине уменьшается напряжённость электрического поля, ускоряющего электроны. В результате ударная ионизация и искровой разряд прекращаются, чтобы через некоторое время, когда напряжение на искровом промежутке увеличится, вновь возобновиться.

Гигантский искровой разряд, возникающий в природных условиях, – это молния. Параметры такого искрового разряда впечатляют: длина – несколько километров, напряжение – до миллиарда вольт, сила тока в молнии – сто тысяч ампер, температура в канале молнии – до десяти тысяч кельвин.

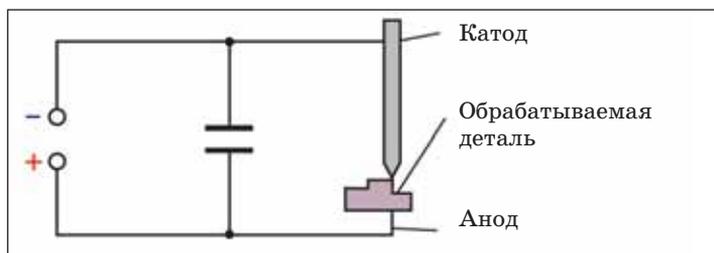


Рис. 115

На практике искровой разряд применяется для обработки металлических деталей. Деталь включают в электрическую цепь (рис. 115). Между анодом (обрабатываемая деталь) и катодом возникает разряд, при этом происходит нагрев небольшого участка катода до очень высокой температуры (10 000–15 000 °С). Это приводит к расплавлению и даже испарению металла с поверхности обрабатываемой детали. Современные промышленные искровые станки – это устройства с числовым программным управлением на базе современных ЭВМ, что позволяет вести на таких станках обработку деталей со сложной геометрией поверхности (рис. 116).

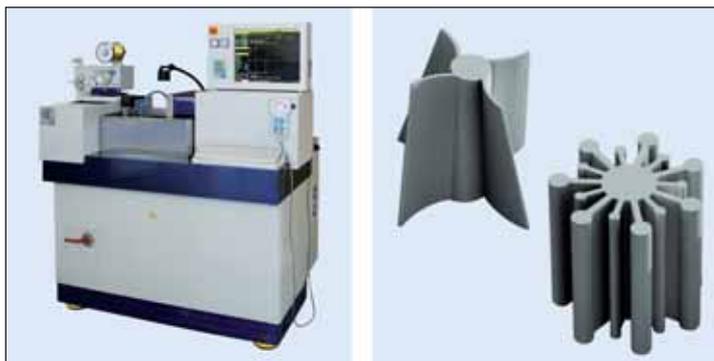


Рис. 116

Для того чтобы выполнялось условие ударной ионизации (24.4), необходима высокая напряжённость электрического поля. Если обратиться, например, к формуле (16.3), то можно сделать вывод, что напряжённость электрического поля тем выше, чем меньше радиус «области», занимаемой электрическими зарядами. Действительно, вокруг заострённых заряженных проводников, вокруг тонких проводов, включённых в электрическую цепь высокого напряжения, существует сильное электрическое поле.

В области, непосредственно примыкающей к такому проводнику, возникают электрические лавины. Атомы, получившие избыточную энергию при ударе электрона, излучают её в виде света. Газовый разряд, происходящий в области высокой напряжённости электрического поля, называют **коронным разрядом** (рис. 117).



Рис. 117



24.4. Почему необходимо учитывать коронный разряд при проектировании линий электропередачи?

Коронный разряд является основой работы электрофильтров, которые широко применяются в промышленности и используются в быту. Электрофильтр представляет собой набор металлических пластин, между которыми расположена тонкая металлическая проволока (рис. 118). При подаче между пластинами и проволокой высокого напряжения около 10 кВ вокруг нити возникает коронный разряд, и воздух ионизируется. Ионы сталкиваются с частицами пыли и заряжают их. Под действием электрического поля заряженные частицы пыли движутся к пластинам и оседают на них.

Может ли условие ударной ионизации (24.4) выполняться при малом значении напряжённости электрического поля? Да, но только в том случае, если длина свободного пробега электрона будет большой! Большая же длина свободного пробега электрона, его продолжительное бесстолкновительное движение возможны только в том случае, если концентрация газа, а следовательно, и его давление мало. Газовый разряд, происходящий при пониженном давлении газа, называют **тлеющим разрядом**.

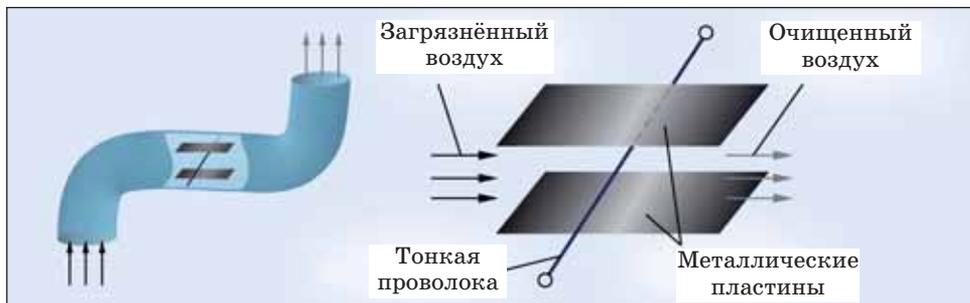


Рис. 118



Рис. 119

внутренняя поверхность стеклянного баллона лампы покрыта специальным веществом – люминофором, которое поглощает ультрафиолет и излучает видимый свет.

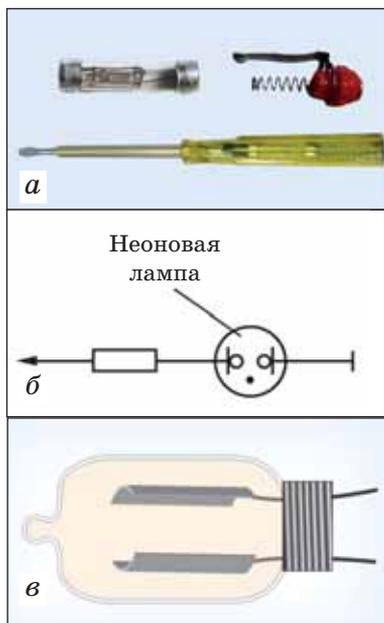


Рис. 120

Если прикоснуться отвёрткой к фазовому проводу, то возникает тлеющий разряд и неоновая лампа светится. При этом через тело человека будет проходить ток. Он равен

$$I = \frac{U}{R},$$

Свечение газа при тлеющем разряде широко применяется на практике, например в люминесцентных лампах (рис. 119). Такие лампы заполнены инертным газом аргоном и парами ртути под давлением 400 Па. Тлеющий разряд, происходящий в лампе, сопровождается появлением ультрафиолетового излучения. Это излучение, как вы знаете, невидимо для человеческого глаза. Поэтому

Ещё один распространённый прибор, в котором используется тлеющий разряд, – это отвёртка-индикатор (рис. 120, а). Чаще всего в такую отвёртку встроена неоновая лампа, последовательно с которой включён резистор сопротивлением около 1 МОм (рис. 120, б). Неоновая лампа представляет собой стеклянный баллон (рис. 120, в), внутри которого помещены два металлических электрода. Баллон заполнен инертным газом неона, находящимся под давлением в несколько сотен паскалей (несколько тысячных долей от атмосферного давления).

К розетке бытовой электросети подведены два провода. Потенциал на одном из них равен 0 В относительно земли (нулевой провод), потенциал на другом – 220 В (фазовый провод). Если прикоснуться отвёрткой-индикатором к нулевому проводу, то разряд происходит не будет и неоновая лампочка не светится.

Если прикоснуться отвёрткой к фазовому

$$I = \frac{220 \text{ В}}{1\,000\,000 \text{ Ом}},$$

$$I = 0,00\,022 \text{ А},$$

$$I = 0,22 \text{ мА}.$$

Такая величина силы тока совершенно безопасна для человека. (Но, как и при проведении любых электротехнических работ, используя отвёртку-индикатор, следует соблюдать правила техники безопасности!)

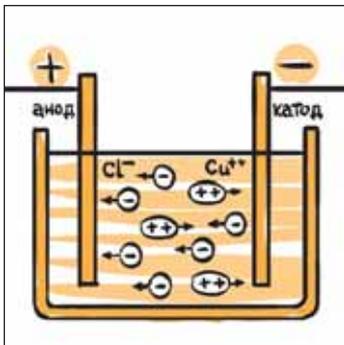
Газовый разряд, несамостоятельный газовый разряд, виды самостоятельного газового разряда: дуговой разряд, искровой разряд, коронный разряд, тлеющий разряд.

24.1 ● Сравните различные виды газового разряда (по величине напряжения, необходимого для протекания газового разряда, по величине давления газа при разряде, по основному механизму образования свободных носителей заряда).

24.2 ● Предложите памятку «Меры безопасности во время грозы».

24.3 ● Газоразрядная трубка для наблюдения тлеющего разряда наполнена азотом при низком давлении. Расстояние между электродами, вмонтированными в трубку, составляет 32 см. Тлеющий разряд в трубке начинается при напряжении 20 кВ. Оцените среднюю длину свободного пробега электронов, если работа по ионизации молекулы азота составляет 16 эВ. Электрическое поле считать однородным.

§ 25. ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ



Никогда со времён Галилея свет не видел стольких поразительных и разнообразных открытий, вышедших из одной головы, и едва ли скоро увидит другого Фарадея.

*Александр Григорьевич Столетов (1839–1896),
известный русский физик*

Вам уже известно, что электрический ток производит химическое действие.

Электролитическая диссоциация. Оценим, чему равна напряжённость электрического поля вблизи заряженной частицы протона. Воспользуемся формулой (16.3).

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2},$$

где q – заряд протона, $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл;

r – расстояние от протона до рассматриваемой точки. По современным научным представлениям радиус протона около $0,9 \cdot 10^{-15}$ м;

ϵ_0 – электрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$.

Пусть $r = 1 \cdot 10^{-15}$ м,

$$E = \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}} \cdot \frac{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}{(0,9 \cdot 10^{-15} \text{ м})^2},$$

$$E = 1,8 \cdot 10^{21} \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Напряжённость электрического поля огромна – 1800 миллиардов миллиардов вольт на метр!



25.1. Что происходит с молекулами солей, кислот и оснований в водном растворе?

При растворении в воде многих солей, кислот и оснований под действием электрического поля молекул воды происходит разрушение молекул этих веществ до отдельных свободных ионов.

Полный или частичный распад растворённого вещества на ионы называется электролитической диссоциацией.

Вещества, распадающиеся в растворе на ионы, называют *электролитами*.

Благодаря процессу электролитической диссоциации водные растворы солей, кислот и оснований (электролиты) представляют собой «бульон» из смеси положительно и отрицательно заряженных ионов с возможным «вкраплением» нераспавшихся молекул. Ввиду наличия свободных носителей зарядов электролиты проводят электрический ток.



25.2. Какие частицы являются свободными носителями заряда в металлах? в газах?

Электролиз. Угольные электроды соединим последовательно с электрической лампой и подключим к источнику тока. Опустим электроды в дистиллированную (чистую) воду (рис. 121, а).

Лампа светиться не будет, тока в цепи нет. Растворим в воде медный купорос ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) – лампочка вспыхивает, в цепи возник электрический ток (рис. 121, б). Через некоторое время мы обнаружим, что на одном из угольных электродов – катоде – осаждается медь. Появление меди на отрицательном электроде катоде вполне объяснимо. Электрический ток в электролитах обусловлен упорядоченным движением положительных и отрицательных ионов под действием электрического источника тока. Положительные ионы меди Cu^{2+} достигают катода, приобретают недостающие им два электрона, превращаются в нейтральный атом меди и осаждаются на катоде.

Процесс выделения вещества при прохождении тока через электролиты называется электролизом.

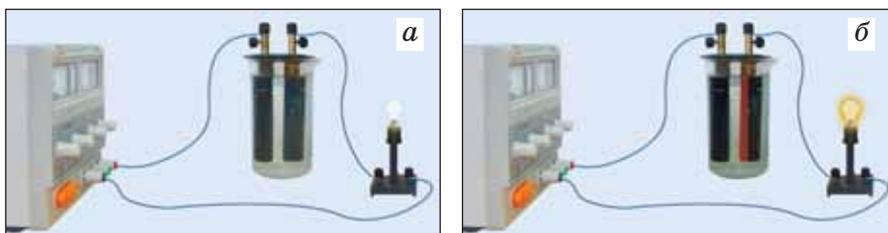


Рис. 121

Основные законы электролиза были экспериментально установлены Майклом Фарадеем в 1833–1834 годах.



25.3. Как, по вашему мнению, зависит масса вещества, выделяющегося при прохождении тока через электролит, от силы тока и продолжительности процесса электролиза?

Во времена Фарадея ещё не были сформулированы понятия об атомно-молекулярном строении вещества. Поэтому открытие законов электролиза, составивших в дальнейшем основу электрохимии, стало значительным научным событием.

Проведём теоретический анализ процесса электролиза. Масса вещества m , выделившегося на электроде в процессе прохождения тока через электролит, очевидно, равна

$$m = m_0 N, \quad (25.1)$$

где m_0 – масса одного иона;

N – число ионов, прошедших по цепи.



25.4. Сколько молекул содержится в одном моле вещества?



25.5. Что называют молярной массой вещества?



25.6. Как рассчитывается масса молекулы (атома, иона), если известна молярная масса вещества?

$$m_0 = \frac{M}{N_A}, \quad (25.2)$$

где M – молярная масса вещества;

N_A – постоянная Авогадро.

Число ионов N можно выразить через общий заряд Δq , прошедший по цепи, и заряд одного иона q_0 .

$$N = \frac{\Delta q}{q_0}. \quad (25.3)$$

Так как сила тока

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t},$$

то

$$\Delta q = I\Delta t, \quad (25.4)$$

где Δt – время прохождения тока через электролит.

Заряд иона q_0 определяется тем, сколько электронов «недостаёт» или «находится в избытке» у иона.

$$q_0 = Z|e|, \quad (25.5)$$

где $Z = 1, 2, 3, \dots$ – число недостающих (или избыточных) электронов у иона;

$|e|$ – модуль заряда электрона.



25.7. Чему равно число Z для иона меди?

С учётом соотношений (25.4) и (25.5) выражение (25.3) запишется в виде

$$N = \frac{I\Delta t}{Z|e|}. \quad (25.6)$$

Подставив выражение (25.2) и полученный результат – выражение (25.6) – в формулу (25.1), имеем

$$m = \frac{M}{Z|e| N_A} \cdot I\Delta t. \quad (25.7)$$

Масса выделившегося на электроде вещества прямо пропорциональна силе тока и времени прохождения тока через электролит.

Процесс электролиза имеет широкое техническое применение: электрометаллургия (получение щелочных и щёлочно-земельных металлов путём электролиза расплавленных руд), создание тонких защитных плёнок на поверхности металлических деталей (серебрение, никелирование), изготовление рельефных копий предметов.

Лабораторная работа «Определение заряда электрона».

Оборудование: стеклянный стакан со слабым раствором соляной кислоты комнатной температуры, шприц вместимостью 20 мл с обрезанной нижней частью, источник тока, амперметр, реостат, ключ, соединительные провода, штатив с лапкой, секундомер, термометр, барометр-анероид (один на класс).

Если опустить в раствор соляной кислоты электроды и подать напряжение, то на катоде будет выделяться водород.

Масса атомарного водорода m , выделившегося из раствора на катоде, связана с силой тока I и временем прохождения тока через электролит Δt соотношением (25.7):

$$m = \frac{M_1}{|e| N_A} \cdot I \Delta t, \quad (25.8)$$

где M_1 – молярная масса атомарного водорода.

При записи выражения (25.8) учтено, что ионы водорода однозарядны, $Z = 1$.

Выразим из соотношения (25.8) заряд электрона:

$$|e| = \frac{M_1 I \Delta t}{m N_A}. \quad (25.9)$$



25.8. Как записывается уравнение состояния для случая идеального газа?

Из двух атомов водорода образуется молекула водорода H_2 . В соответствии с уравнением состояния идеального газа давление p , объём V и абсолютная температура T водорода связаны между собой соотношением

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad (25.10)$$

где M – молярная масса молекулярного водорода;

R – газовая постоянная.

Выразим из соотношения (25.10) массу водорода:

$$m = \frac{pVM}{RT}. \quad (25.11)$$

Подставив полученное выражение (25.11) в формулу (25.9), будем иметь

$$|e| = \frac{M_1 I \Delta t RT}{pVM N_A}. \quad (25.12)$$

Упростим полученное выражение (25.12). Во-первых, отношение молярных масс атомарного и молекулярного водорода равно 1/2:

$$\frac{M_1}{M} = \frac{1}{2}.$$

Во-вторых, газовая постоянная R равна произведению постоянной Авогадро N_A и постоянной Больцмана k (см. с. 43 учебника):

$$R = N_A k.$$

Тогда выражение (25.12) окончательно примет вид

$$|e| = \frac{I \Delta t k T}{2 P V}. \quad (25.13)$$

Указания к работе:



Задание 1. К нижней части шприца с помощью клейкой ленты прикрепите провод так, чтобы изогнутая часть провода без изоляции находилась внутри шприца. Надавлив на шток, сместите поршень шприца вниз до нулевой отметки. Поместите шприц в стеклянный стакан со слабым раствором соляной кислоты. Потяните за шток, чтобы поршень шприца сместился до упора вверх и жидкость из стакана под действием атмосферного давления полностью заполнила шприц. Закрепите шприц в лапке штатива.

Соберите электрическую цепь, соединив последовательно источник тока, амперметр, реостат, ключ (рис. 122, а). Проводник, идущий от анода – положительного полюса источника тока, опустите непосредственно в стакан с жидкостью. Провод, введённый внутрь шприца, подключите к катоду источника тока.



25.9. Чем обусловлена выбранная полярность включения приборов в электрическую цепь?

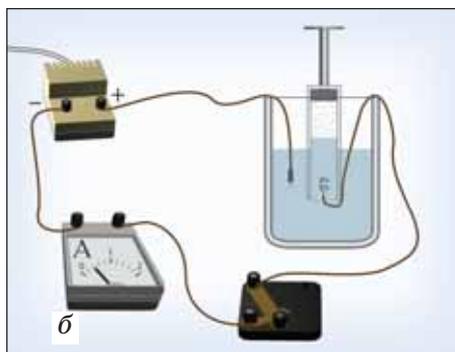
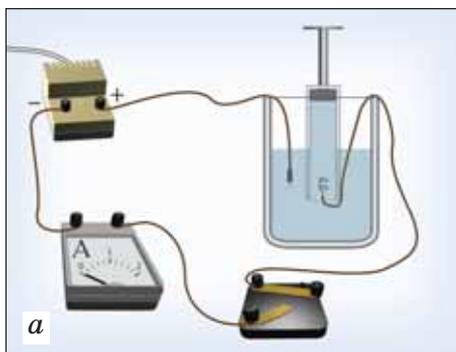


Рис. 122

Если замкнуть ключ, то в цепи будет идти ток и на катоде (внутри шприца) начнёт выделяться водород, постепенно вытесняя жидкость из шприца.

Замкните ключ, с помощью реостата установите силу тока 0,3 А и измерьте, за какое время в шприце собирается 15–20 мл водорода (рис. 122, б).



25.10. Какую долю составляет один миллилитр от кубического метра?

Измерьте температуру воздуха в учебном кабинете и атмосферное давление.

Проведите вычисление значения заряда электрона.



25.11. Какие из физических величин, значения которых потребовались для определения заряда электрона [формула (25.13)], измерены наименее точно? Каким образом можно было бы повысить точность их измерения?

Относительная погрешность определения заряда электрона ε может быть рассчитана по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta V}{V}, \quad (25.14)$$

где ΔI – абсолютная погрешность измерения силы тока;

ΔV – абсолютная погрешность измерения объёма газа.

По определению абсолютной погрешности,

$$\varepsilon = \frac{\Delta|e|}{|e|},$$

где $\Delta|e|$ – абсолютная погрешность измерения заряда электрона;

$|e|$ – значение заряда электрона, вычисленное по формуле (25.13).

Отсюда

$$|\Delta e| = \varepsilon \cdot |e|. \quad (25.15)$$

Вычислите относительную погрешность измерения заряда электрона ε [формула (25.14)].

Вычислите абсолютную погрешность измерения заряда электрона $|\Delta e|$ [формула (25.15)].

Сделайте вывод, попадает ли табличное значение заряда электрона в интервал ($|e| - |\Delta e|$, $|e| + |\Delta e|$).



Задание 2. На опыте убедитесь, что масса вещества, выделившегося при электролизе, прямо пропорциональна времени прохождения тока через электролит.

Электролитическая диссоциация, электролит, электролиз, формула Фарадея для расчёта массы вещества, выделяющегося при электролизе, электролитический метод определения заряда электрона.

25.1 ● Если проводить электролиз медного купороса (на катоде осаждаются ионы меди Cu^{2+}) и нитрата серебра (на катоде осаждаются ионы серебра Ag^+) в течение одного и того же времени при одинаковой силе тока, то в каком случае металла выделится больше (по массе)? Ответ обосновать.

25.2 ● Два одинаковых стеклянных стакана заполнили одинаковыми объёмами раствора медного купороса, но различной концентрации. В каждом из стаканов закрепили по паре одинаковых угольных электродов, находящихся на одинаковых расстояниях друг от друга. Для проведения электролиза стаканы с растворами медного купороса включили в электрическую цепь, соединив их вначале последовательно (рис. 123, а), а затем параллельно (рис. 123, б). Одинаковое ли количество меди осаждалось при этом на угольных катодах за единицу времени? Ответы обосновать.

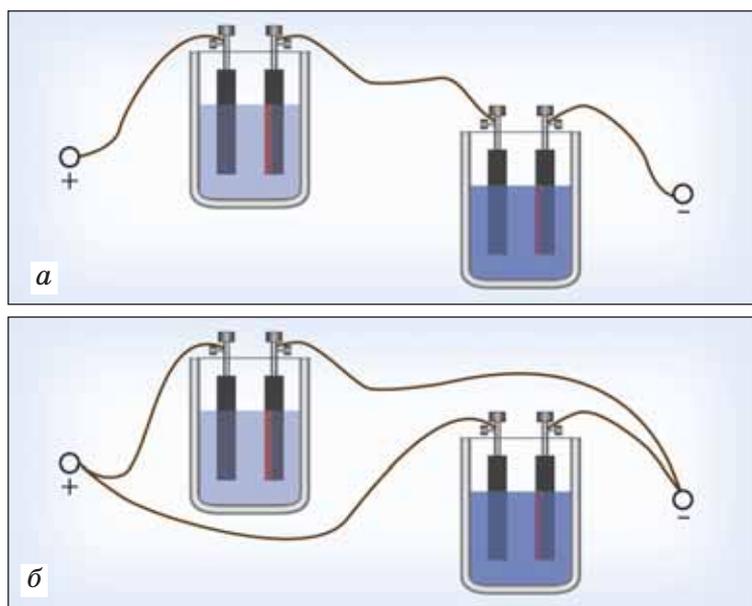


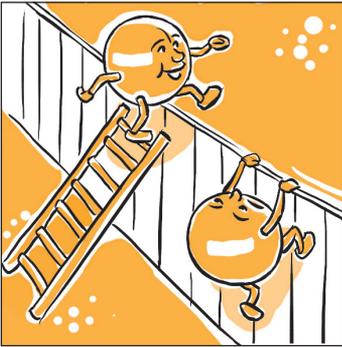
Рис. 123

25.3 ● Стальную деталь необходимо покрыть слоем никеля толщиной 25 мкм. Сколько времени потребуется для создания покрытия, если при электролизе осаждаются ионы никеля Ni^{2+} и процесс никелирования идёт при плотности тока¹, равной $0,6 \text{ A/cm}^2$? Плотность никеля $8,9 \text{ г/см}^3$.

Используя интернет-источники, выясните, почему в настоящее время в ряде стран существенно ограничено применение хромирования.

¹ Плотность тока j определяется отношением силы тока I к площади поперечного сечения проводника s .

§ 26. ПОЛУПРОВОДНИКИ



«Полупроводниками... будут называться проводники с металлической проводимостью, сопротивление которых очень сильно изменяется с температурой».

*И. Кёнигсбергер, немецкий электрохимик.
Из первого в истории обзора по свойствам
полупроводников. 1914 г.*

Вам уже известно о существовании полупроводников, обладающих удивительными электрическими свойствами.

Особые свойства полупроводников. Помимо проводников и изоляторов существует обширная группа химических элементов и химических соединений, называемая полупроводниками. Полупроводники имеют целый ряд свойств, которые их отличают от других веществ:

- сопротивление полупроводников, как правило, уменьшается с ростом температуры,
- сопротивление полупроводников уменьшается при действии на них света,
- возможен особый характер движения электронов в полупроводниках,
- сопротивление полупроводников сильно зависит от различного рода примесей в них.

В отличие от металлов *при увеличении температуры сопротивление полупроводников уменьшается*. Это свойство полупроводников использовано в приборе *терморезисторе (термисторе)*.

Включим термистор в электрическую цепь, содержащую источник тока и амперметр. При комнатной температуре сила тока в цепи невелика. При нагревании же термистора (рис. 124) сила тока в цепи увеличивается в несколько раз – это означает, что сопротивление термистора уменьшается. Термисторы применяют в устройствах автоматической регулировки температуры: бытовая электроника (холодильники и морозильники, посудомоечные

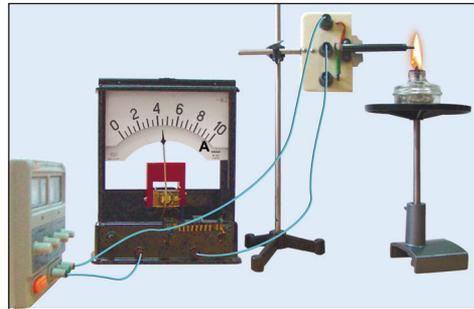


Рис. 124

машины), автомобильная электроника (измерение температуры воды или масла, контроль температуры в салоне автомобиля), телекоммуникации (измерение и компенсация температуры в мобильных телефонах) и так далее. Используют термисторы для измерения температуры (возможный интервал измеряемых температур от -260 до 1100 °С) и мощности электромагнитного излучения.

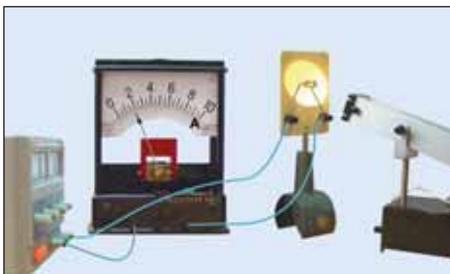


Рис. 125

Зависимость сопротивления полупроводника от его освещённости использована в приборе фоторезисторе. Соберём электрическую цепь, подключив к источнику тока амперметр и фоторезистор. Когда фоторезистор не освещён, тока в цепи практически нет. Но если направить на фоторезистор свет от лампы (рис. 125), возникает заметный по величине ток. Следовательно,

при освещении полупроводника его сопротивление уменьшается. В зависимости от использованного полупроводникового материала фоторезисторы чувствительны к различным диапазонам электромагнитного излучения (инфракрасному, видимому, ультрафиолетовому). Фоторезисторы находят самое широкое применение в различной автоматике: датчики пересечения инфракрасного луча для охранной сигнализации и для защиты персонала от входа в опасные зоны, датчики контроля загрязнения воды и контроль за запылённостью и заражённостью на различных объектах, устройства для фотоприборов, ведущих счёт деталей, перемещающихся по конвейеру, или измеряющих влажность по отражённому свету от поверхности изделия.

Элементы зонной теории. Проводимость металлов была ранее объяснена нами в рамках модели газа свободных электронов, заполняющего кристаллическую решётку. Но по какой причине одни вещества являются проводниками, а другие — изоляторами или полупроводниками? При поиске ответа на этот вопрос необходимо учитывать взаимодействие атомов между собой и с электронами.

Атомы, как вам известно, являются *квантовыми системами*. Строгое научное описание свойств атомов и их взаимодействия с другими атомами возможно только в рамках *квантовой физики*. В начале XX века учёные выяснили, что законы механики Ньютона (законы классической физики, как их принято называть) неприменимы для описания движения и взаимодействия микрочастиц (электронов, атомов).

Трудами многих выдающихся учёных была создана *квантовая механика* – теория, устанавливающая способ описания и законы движения микрочастиц и их систем.

Первая теория строения атома, в основу которой были положены квантовые представления, была разработана великим датским физиком и теоретиком Нильсом Бором в 1913 году. Нильс Бор установил, что энергия электрона в атоме не может иметь произвольное значение – *электрон в атоме может находиться только в строго определённых, неизменных со временем энергетических состояниях*.

На рисунке 126 приведена энергетическая диаграмма атома водорода, рассчитанная Нильсом Бором. Условно каж-

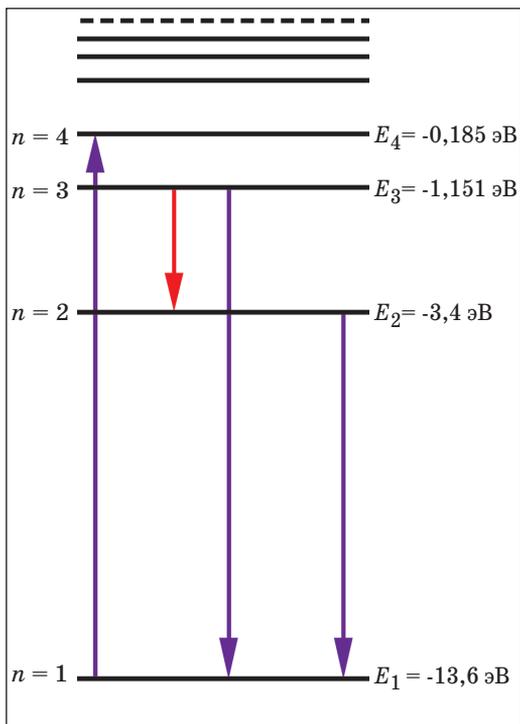


Рис. 126

дое допустимое энергетическое состояние атома с определённым номером n изображено горизонтальной чертой – *энергетическим уровнем*. Энергия состояния указана на диаграмме в электронвольтах¹, и она имеет отрицательные значения. Почему? При построении диаграммы энергия «наиболее энергичного» электрона, который сможет удалиться от ядра, преодолев его притяжение, принимается равной нулю. Энергия остальных, «менее энергичных» электронов, которые «не могут выпрыгнуть из потенциальной ямы», считается отрицательной.

Теория Нильса Бора смогла объяснить загадку *линейчатых спектров*. Если взять вещество в газообразном состоянии и сообщить атомам избыток энергии, например при протекании тока через газ, то газ будет светиться. При этом атомы, получившие избыток энергии, излучают кванты строго определённой энергии при переходе электрона в атоме из состояния с большей энергией («высокий» энергетический уровень) в состояние с меньшей энергией («низкий» энергетический уровень).

¹ 1 эВ = 1,60219 · 10⁻¹⁹ Дж.

Если вспомнить, как энергия кванта E связана с частотой излучения ν соотношением

$$E = h\nu, \quad (26.1)$$

где h – постоянная Планка, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с,

то загадка линейчатых спектров разрешена: возбуждённые атомы излучают строго определённые частоты (длины волн), соответствующие определённым квантовым переходам в атоме. На рисунке 127 в качестве примера показаны линии излучения атома водорода в видимой части спектра, которые возникают при переходе электрона в атоме с энергетических уровней $n = 3, 4, 5, 6$ на энергетический уровень $n = 2$.



Рис. 127

Линейчатые спектры дают вещества в газообразном состоянии, то есть когда атомы практически не взаимодействуют между собой и каждый атом обладает «индивидуальным» набором энергетических уровней, одинаковых для всех атомов одного и того же вещества (рис. 128).

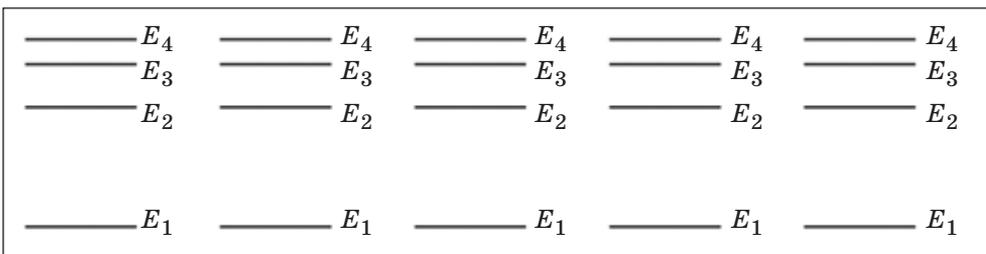


Рис. 128. Энергетические уровни невзаимодействующих атомов

При образовании твёрдого тела, при сближении атомов и их взаимодействии множество изолированных уровней отдельных атомов объединяются в энергетическую зону (рис. 129). Образование зонного энергетического спектра (расщепление энергетических уровней) в твёрдом теле является сугубо квантовым эффектом, который обусловлен законами квантовой физики.

Так как число атомов в твёрдом теле сопоставимо с постоянной Авогадро ($N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ 1/моль), а ширина энергетической зоны составляет порядка нескольких электронвольт, то «расстояние» между соседними энергетическими уровнями равно

$$\frac{1 \text{ эВ}}{10^{23}} \approx 10^{-23} \text{ эВ}.$$

Средняя энергия теплового движения частиц \bar{E} составляет при комнатной температуре ($T = 300 \text{ К}$)

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT,$$

где k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

$$\bar{E} = \frac{3}{2} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \cdot 300 \text{ К},$$

$$E = 6 \cdot 10^{-21} \text{ Дж},$$

$$\bar{E} = 0,04 \text{ эВ}.$$

Этой энергии более чем достаточно для перехода электрона с одного энергетического уровня на другой в пределах одной энергетической зоны.

Введём следующие обозначения: основную энергетическую зону (на рис. 129 это зона, образованная при расщеплении энергетического уровня E_1), заполненную электронами, будем называть *валентной зоной*. Зону возбуждённых уровней (на рис. 129 это зона, образованная при расширении энергетического уровня E_2) будем называть *зоной проводимости*. Энергетическое «расстояние» от «потолка» валентной зоны до «дна» зоны проводимости – *запрещённая зона*. Соответствующая схема зон представлена на рисунке 130.

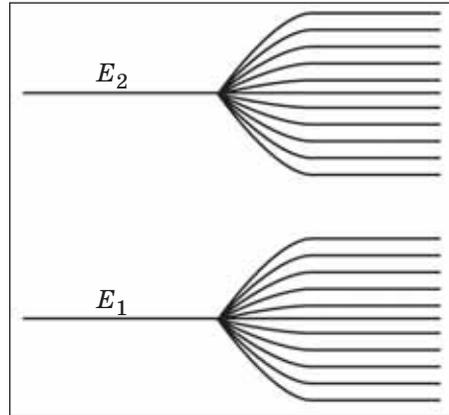


Рис. 129. Образование энергетических зон твёрдого тела

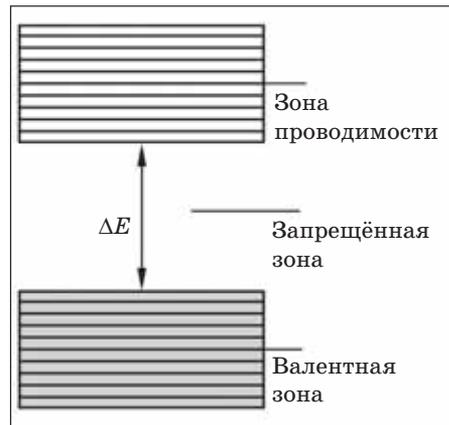


Рис. 130

Упрощая ситуацию, можно сказать, что с точки зрения зонной теории различия в электрических свойствах металлов, изоляторов и полупроводников объясняются шириной запрещённой зоны ΔE .

Если ширина запрещённой зоны ΔE равна нулю или зона проводимости и валентная зона и вовсе перекрываются (рис. 131, а), то вещество обладает металлическими свойствами. В этом случае часть электронов либо уже свободна – находится в зоне проводимости, либо электрон, незначительно увеличив свою энергию за счёт электрического поля или теплового движения, может перейти на более высокий энергетический уровень (напомним, что «расстояние» между уровнями всего $\sim 10^{-23}$ эВ). Такие свободные электроны и создают электрический ток в металле¹.

В диэлектриках «ширина» запрещённой зоны более 2 эВ (рис. 131, б). При абсолютной температуре 0 К все электроны у диэлектриков находятся в валентной зоне, а в зоне проводимости (в отличие от металлов) электронов нет. При повышении температуры лишь ничтожное число электронов, чья энергия во много раз больше средней энергии теплового движения, могут преодолеть запрещённую зону и оказаться в зоне проводимости. Поэтому диэлектрики не имеют свободных электронов и не проводят электрический ток.

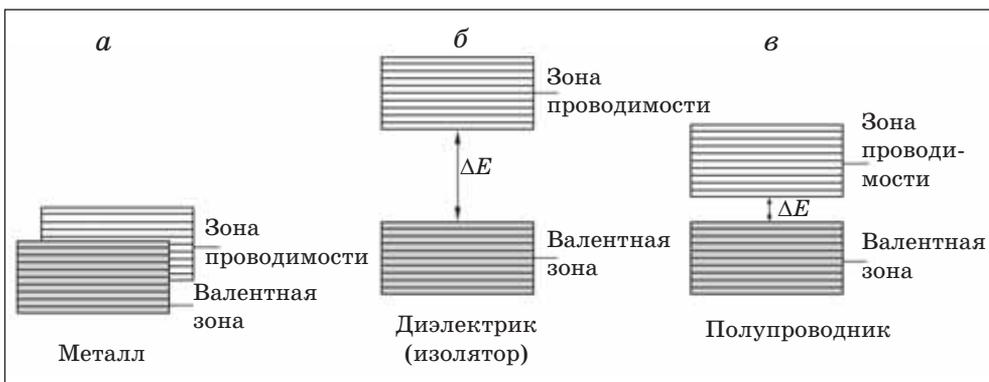


Рис. 131

С точки зрения зонной теории принципиального отличия полупроводников от диэлектриков нет. У полупроводников между зоной про-

¹ Движение электрона в квантовой механике рассматривается как процесс перехода из одного возможного квантового состояния в другое. Чтобы такие переходы были возможны, необходимо, чтобы доступное по энергии квантовое состояние было свободно, не занято электроном. Именно такая ситуация и наблюдается в металлах.

проводимости и валентной зоной существует запрещённая зона, но «ширина» запрещённой зоны у них также существенно меньше, чем у полупроводников (рис. 131, в). Так, например, у таких типичных полупроводников, как германий (Ge) и кремний (Si), «ширина» запрещённой зоны ΔE равна соответственно 0,7 и 1,1 эВ.

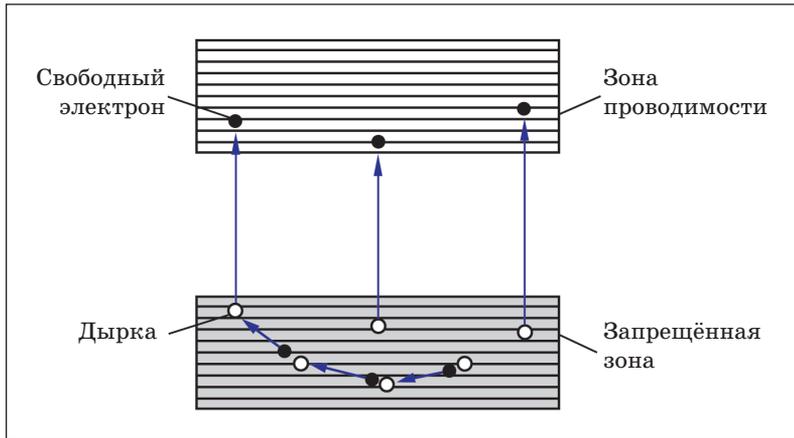


Рис. 132

При абсолютной температуре 0 К полупроводник так же, как и диэлектрик, не будет проводить электрический ток. Свободных электронов в зоне проводимости нет, а валентная зона заполнена, и отсутствуют свободные квантовые состояния, по которым мог бы перемещаться электрон.

При повышении температуры ситуация изменяется. Благодаря малой «ширине» запрещённой зоны некоторая часть электронов может быть «заброшена» тепловым движением из валентной зоны в зону проводимости (рис. 132). Хотя при комнатной температуре ($T \approx 300$ К) средняя энергия теплового движения частиц и составляет всего около 0,04 эВ (что существенно меньше «ширины» запрещённой зоны), но имеются и электроны, чья энергия гораздо выше, чем средняя величина.

С ростом температуры число электронов, которые могут преодолеть энергетический «барьер» – запрещённую зону, возрастает. По этой причине – по причине увеличения числа свободных носителей заряда – сопротивление полупроводников уменьшается при повышении температуры.

Сопротивление полупроводников уменьшается также и при их освещении. Воспринимаемый нами зрительно диапазон (оптическое излучение) – это электромагнитное излучение с длинами волн от 0,4 до 0,76 мкм. Напомним, что длина волны λ , частота излучения ν и скорость света в вакууме c ($c = 2,9979 \cdot 10^8$ м/с) связаны соотношением

$$c = \lambda \nu.$$

Используя данное соотношение и выражение для энергии кванта (26.1), получим, что

$$E = \frac{hc}{\lambda}.$$

Вычислим в качестве примера энергию кванта инфракрасного излучения ($\lambda = 0,76$ мкм):

$$E = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 2,9979 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{0,76 \cdot 10^{-6} \text{ м}},$$

$$E = 2,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж},$$

$$E = 1,6 \text{ эВ}.$$

Расчёт показывает, что квант излучения с такой энергией способен «помочь» электрону преодолеть запрещённую зону в полупроводниках. Следовательно, причина уменьшения сопротивления полупроводников при их освещении та же, что и при повышении температуры, – увеличение числа свободных носителей заряда.

Рассмотренные нами элементы зонной теории позволили выяснить, почему и каким образом сопротивление полупроводников зависит от температуры и освещённости. Также зонная теория позволяет выяснить, каковы механизмы проводимости в полупроводниках!

Во-первых, электроны, оказавшиеся в зоне проводимости, могут совершать внутризональные квантовые переходы (в зоне проводимости есть свободные квантовые состояния!). При этом электроны будут *перемещаться в пространстве* по полупроводнику под действием электрического поля, от которого электроны и «черпают» энергию для осуществления квантовых переходов с одного энергетического уровня в зоне проводимости на другой. Такой механизм проводимости сродни проводимости, существующей в металлах, и называется *электронной проводимостью*.

Во-вторых, переход электронов из валентной зоны в зону проводимости освобождает квантовые состояния в валентной зоне (рис. 132). Поэтому в полупроводниках реализуется и *иной механизм проводимости*: электроны, находящиеся в валентной зоне, могут совершать

внутризонные квантовые переходы (в валентной зоне возникли свободные квантовые состояния!). При этом электроны также будут *перемещаться в пространстве* под действием электрического поля, внося свой вклад в электрический ток в полупроводнике.

Свободное квантовое состояние в валентной зоне, которое покинул электрон, имеющий отрицательный заряд, называют в физике полупроводников «дыркой». Дырке приписывают положительный заряд, и вместо того чтобы анализировать движение электронов валентной зоны, принято описывать движение положительной квазичастицы (как бы частицы) дырки. Такой механизм проводимости называют *дырочной проводимостью*.

Мы рассмотрели с вами электропроводность идеального проводника, в котором отсутствуют дефекты, например, в виде примесей. Электропроводность чистого беспримесного полупроводника принято называть собственной электропроводностью. *Собственная электропроводность полупроводников обусловлена электронной и дырочной проводимостью*.

Роль примеси в полупроводниках. Даже малейшее количество примесей разительным образом меняет картину электропроводности в полупроводниках. Примесь резко изменяет и величину электропроводности, и то, какой из механизмов проводимости преобладает – электронная или дырочная. Так, например, добавление к чистому кристаллу кремния фосфора в пропорции всего 1 атом фосфора на 100 000 атомов кремния увеличивает электропроводность кристалла более чем в сто тысяч раз! При этом практически полностью прохождение тока через кристалл осуществляется только путём электронной проводимости¹. Электропроводность полупроводника, обусловленную наличием примеси в полупроводнике, называют примесной электропроводностью.

Чем же обусловлена зависимость электрических свойств полупроводников от наличия примеси в них? Это объясняется тем, что при введении примеси в энергетическом спектре полупроводника в запрещённой зоне возникают добавочные энергетические уровни.

¹ Представьте, как сложно было изучать полупроводники и получать достоверные сравнимые экспериментальные результаты, если в начале XX века вещества с концентрацией примеси 0,1% уже считались чистыми. Никогда ранее физики не встречались с ситуацией, когда фундаментальные свойства изучаемого материала в такой степени зависели бы от ничтожного количества примеси в нём.

Так, при введении в кристалл германия (Ge) или кремния (Si)¹ в качестве примеси элементов V группы периодической системы фосфора (P), мышьяка (As) в запрещённой зоне возникают добавочные примесные энергетические уровни вблизи дна зоны проводимости (рис. 133). В этом случае энергетическое «расстояние» от примесных уровней до дна зоны проводимости ΔE_{np} невелико по сравнению с «шириной» запрещённой зоны ΔE .

$$\Delta E_{np} < \Delta E.$$

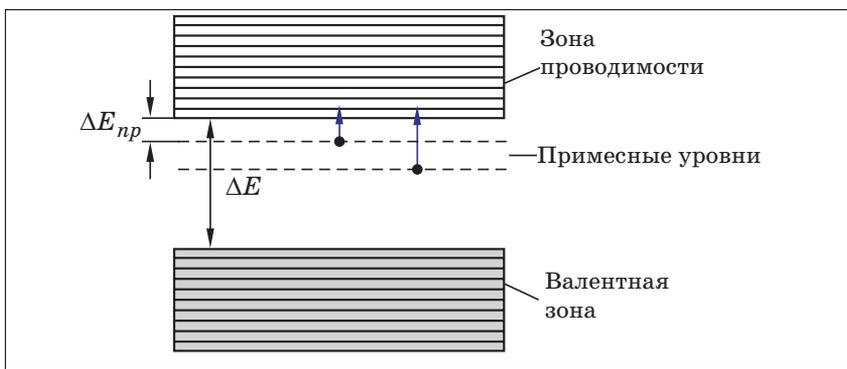


Рис. 133. Энергетический спектр полупроводника с донорной примесью (полупроводник *n*-типа)

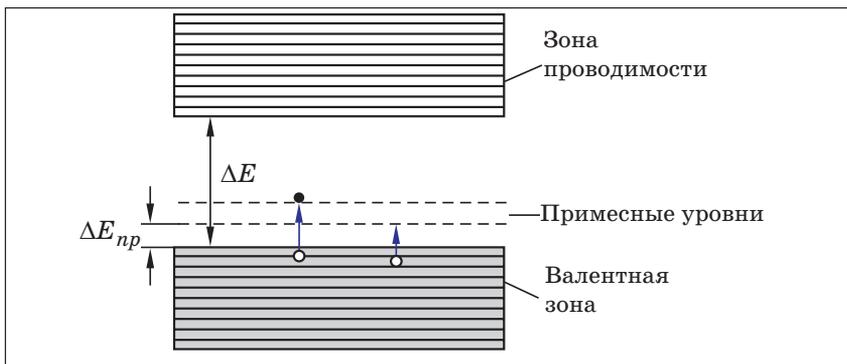


Рис. 134. Энергетический спектр полупроводника с акцепторной примесью (полупроводник *p*-типа)

¹ Германий и кремний – элементы IV группы Периодической системы.

По этой причине электроны, заполнявшие примесные уровни, практически полностью переходят в зону проводимости. Действительно, если раньше энергетическую щель запрещённой зоны могли преодолеть только «редкостные энергетические гиганты – электроны», совершающие переход «валентная зона – зона проводимости», то при наличии примесных уровней переход электронов с примесных уровней в зону проводимости – рядовое энергетическое событие. *Примесь, поставляющая электроны в зону проводимости, называется донорной примесью.*



26.1. Какой проводимостью в основном будет обладать полупроводник с донорной примесью – электронной или дырочной?

Полупроводники с донорной примесью называют *полупроводниками n -типа* (от английского слова *negative* – отрицательный).

Если ввести в кристалл германия или кремния элементы III группы Периодической системы галлий (Ga), индий (In), то ситуация будет диаметрально противоположной. В запрещённой зоне возникают добавочные примесные энергетические уровни вблизи потолка валентной зоны (рис. 134). Это даёт возможность электронам из валентной зоны «заселить» примесные уровни. Примесь, предоставляющая возможность перехода электронам из валентной зоны на дополнительные примесные уровни, называется *акцепторной примесью*.

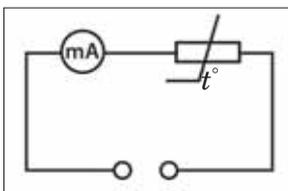
Благодаря акцепторной примеси в валентной зоне возникают свободные квантовые состояния – дырки.



26.2. Какой примесью в основном будет обладать полупроводник с акцепторной примесью – электронной или дырочной?

Полупроводники с акцепторной примесью называют *полупроводниками p -типа* (от английского слова *positive* – положительный).

Зависимость сопротивления полупроводников от температуры и освещённости, терморезистор (термистор), фоторезистор, энергетический спектр беспримесного полупроводника (валентная зона, зона проводимости, запрещённая зона), классификация веществ по «ширине» запрещённой зоны, электронная проводимость полупроводников, дырочная проводимость полупроводников, энергетический спектр примесного полупроводника (случай донорной и акцепторной примеси), полупроводник n -типа, полупроводник p -типа.



26.1 ● Термистор подключён к источнику тока напряжением 3 В (рис. 135). Каково показание миллиамперметра в данной цепи при температуре термистора $80\text{ }^{\circ}\text{C}$? Зависимость сопротивления термистора от температуры приведена в таблице:

Рис. 135

Температура термистора, $^{\circ}\text{C}$	-25	0	25	50	75	100	150	200
Сопротивление термистора, кОм	580	145	46	16,4	6,7	3,2	0,83	0,30

26.2 ● Типичными полупроводниками, широко использующимися в современной электронике, являются германий и кремний. Заполните таблицу, приведённую ниже, исходя из того, что примесные полупроводники изготовлены на их основе.

Название примесного полупроводника	Полупроводник n -типа ($n\text{-Ge}$, $n\text{-Si}$)	Полупроводник p -типа ($p\text{-Ge}$, $p\text{-Si}$)
Название примеси в полупроводнике		
Примеры химических элементов, которые могут быть использованы в качестве примеси		
К какой группе (группам) Периодической системы относится примесь		
Каков (в основном) механизм проводимости		
Основные носители заряда		
Неосновные носители заряда		
Энергетический спектр		

26.3 ● Одним из полупроводниковых материалов является арсенид индия (InAs) – химическое соединение индия и мышьяка. Ширина запрещённой зоны в данном полупроводнике составляет $0,354\text{ эВ}$. Оцените, может ли арсенид индия быть использован для регистрации ИК-излучения.

§ 27. p - n -ПЕРЕХОД

Известна характерная особенность людей: до того, как будет сделано какое-либо замечательное открытие, они удивляются, как это оно может быть сделано, а после того, как оно сделано, удивляются, как это оно не было открыто раньше.

*Ян Амос Каменский (1592–1670),
чешский мыслитель-гуманист,
педагог, писатель*

Вам уже известно, что полупроводники широко используются на практике.

p - n -Переход. p - n -Переходом называют контакт в кристалле полупроводника двух различных примесных областей полупроводника с дырочной и электронной проводимостями. Практически, например, можно создать p - n -переход в процессе выращивания кристалла полупроводника, добавляя в растущий кристалл первоначально акцепторную, а затем и донорную примесь.



27.1. Что является основными носителями заряда, обеспечивающими электропроводность полупроводника p -типа с акцепторной примесью?



27.2. Что является основными носителями заряда, обеспечивающими электропроводность полупроводника n -типа с донорной примесью?

Важную роль в образовании p - n -перехода играет явление диффузии.



27.3. В чём заключается явление диффузии?

Обратимся к рисунку 136, на котором изображена схема p - n -перехода.

В области полупроводника, снабжённого донорной примесью (полупроводник n -типа), концентрация электронов существенно выше, чем в области полупроводника, снабжённого акцепторной примесью (полупроводник p -типа).

По этой причине будет происходить диффузия электронов через p - n -переход из полупроводника n -типа в полупроводник p -типа.

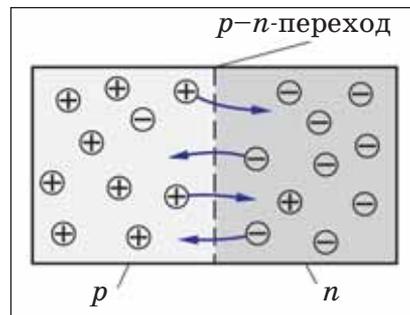


Рис. 136

Электроны, попадая в область полупроводника p -типа, во-первых, приносят отрицательный электрический заряд. Во-вторых, встречаясь с дырками, электроны заполняют свободные состояния в валентной зоне, и в области полупроводника p -типа, прилегающей к p - n -переходу, исчезают свободные носители заряда.

Аналогичным образом дырки диффундируют через p - n -переход из области p -типа в область n -типа. Дырки приносят в полупроводник n -типа положительный заряд, встречаются с электронами, и происходит обеднение области полупроводника n -типа, прилегающей к p - n -переходу, свободными носителями заряда.

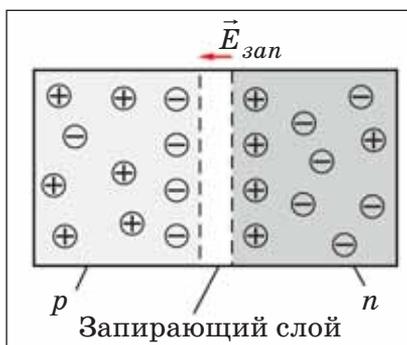


Рис. 137

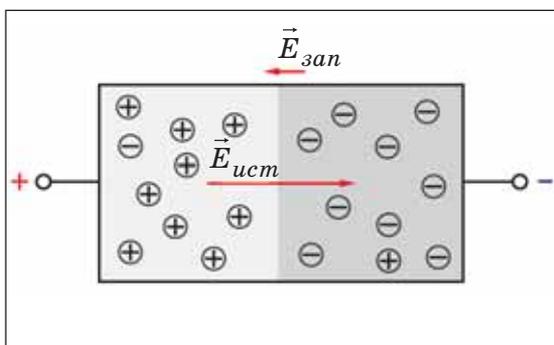


Рис. 138

Образовавшийся за счёт диффузии электронов и дырок слой на p - n -переходе, практически не содержащий свободных носителей заряда, называют *запирающим слоем* (рис. 137). Сопротивление запирающего слоя, очевидно, существенно больше, чем сопротивление других областей кристалла полупроводника.

Запирающий слой представляет собой своеобразный конденсатор, где электроны, диффундировавшие в полупроводник p -типа, образуют отрицательно заряженную «обкладку конденсатора», а дырки, проникшие в полупроводник n -типа, – положительно заряженную «обкладку конденсатора» (рис. 137).

Включим p - n -переход в электрическую цепь так, как это показано на рисунке 138. Электрод батареи с более высоким значением потенциала («плюс» батареи) подключён к области p -типа, а электрод батареи с более низким значением потенциала («минус» батареи) – к области n -типа. Напряжённость электрического поля, созданного источником в полупроводнике $\vec{E}_{уст}$, направлена противоположно напряжённости электрического поля запирающего слоя \vec{E}_{zap} .

В итоге напряжённость электрического поля на запирающем слое уменьшается, либо вовсе становится равной нулю, либо меняет направление на противоположное в сравнении с первоначальным. В такой ситуации толщина запирающего слоя уменьшается или запирающий слой полностью исчезает – исчезает область повышенного электрического сопротивления. Ничто не препятствует движению дырок и электронов через *p-n*-переход под действием электрического поля источника тока. Как говорят, *p-n*-переход включён в «прямом направлении», его электрическое сопротивление мало и через *p-n*-переход идёт ток.

Что произойдёт, если поменять полярность подключения батареи (рис. 139)? При таком включении полупроводника в электрическую цепь напряжённость электрического поля на запирающем слое увеличится. Электрическое поле удалит дырки в области *p*-типа от *p-n*-перехода, и одновременно оно удалит электроны в области *n*-типа от *p-n*-перехода. В результате ширина запирающего слоя, обусловленного свободными носителями заряда, увеличится, следовательно, электрическое сопротивление *p-n*-перехода возрастёт. Через *p-n*-переход при таком направлении электрического поля могут «путешествовать» только неосновные носители заряда – электроны из области *p*-типа и дырки из области *n*-типа. Но неосновных носителей заряда в примесном полупроводнике крайне мало, и тока через *p-n*-переход практически не будет. Как говорят, *p-n*-переход включён в «обратном» направлении, его электрическое сопротивление велико и ток через *p-n*-переход не идёт.

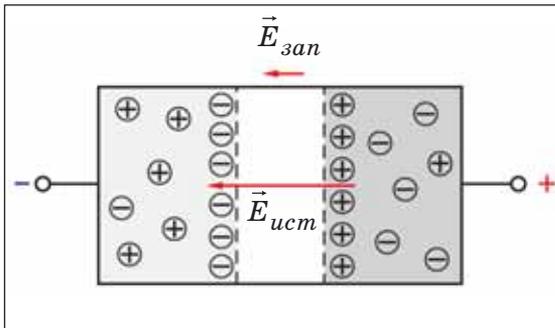


Рис. 139



Рис. 140

Полупроводниковый диод. Одним из приборов, в котором используется свойство односторонней проводимости *p-n*-перехода, является полупроводниковый диод (рис. 140).

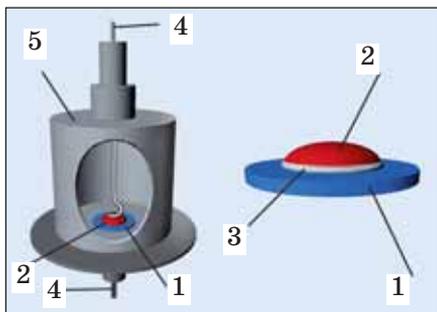


Рис. 141

- 1 – кристалл германия n -типа;
 2 – кристалл германия p -типа;
 3 – p - n -переход;
 4 – контакты;
 5 – корпус.

ффика соответствует «прямому» включению диода (рис. 143, б). При таком включении диода в электрическую цепь уже при напряжении в доли вольта сила тока составляет 10 мА, то есть в 20 000 раз больше, чем при «обратном» включении диода.

Практическая работа «Изучение полупроводникового диода».

Оборудование: диод полупроводниковый, низковольтная лампа, реостат, амперметр, вольтметр, источник тока, ключ, соединительные провода.

Указания к работе:



Задание 1. Проверка односторонней проводимости диода.

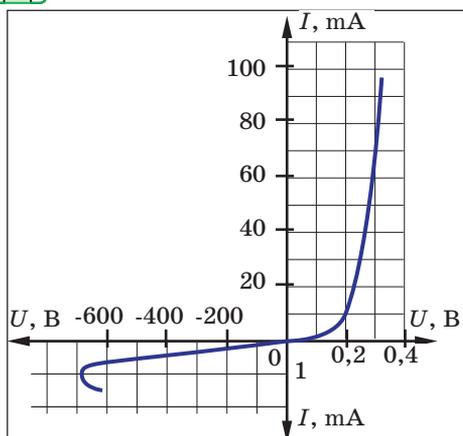


Рис. 142

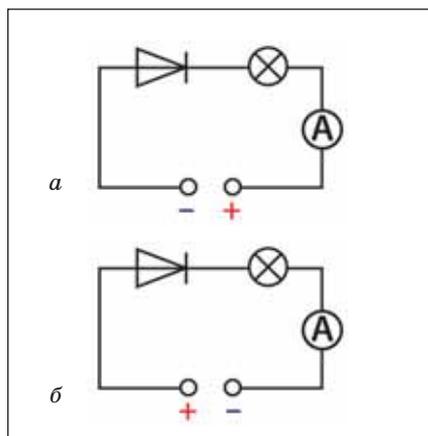


Рис. 143

p - n -Переход диода может быть изготовлен следующим образом: в кристалл германия n -типа (с донорной примесью) вплавляют акцепторную примесь, например, индий. В результате часть кристалла германия приобретает дырочную проводимость и становится полупроводником p -типа (рис. 141).

Вольт-амперная характеристика диода изображена на рисунке 142. Левая часть графика соответствует «обратному» включению диода (рис. 143, а). Даже при напряжении в сотни вольт ток через диод составляет всего 0,5 мкА. Правая часть графика

Соберите электрическую цепь, схема которой изображена на рисунке 143, а. Замкните цепь. Убедитесь, что диод не проводит ток в «обратном» направлении. Используя дополнительный соединительный провод, проверьте, что собранная вами электрическая цепь исправна и что отсутствие тока в ней действительно обусловлено значительным сопротивлением диода в «обратном» направлении.

Соберите электрическую цепь, схема которой изображена на рисунке 143, б. Замкните цепь. Убедитесь, что диод проводит ток в «прямом» направлении. Измерьте силу тока.



Задание 2. Изучение вольт-амперной характеристики диода.

Соберите электрическую цепь, схема которой показана на рисунке 144. Измерьте силу тока через *p-n*-переход при различных значениях напряжения на диоде U . Данные занесите в таблицу.

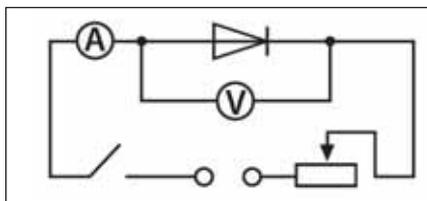


Рис. 144

U , В								
I , А								

Постройте вольт-амперную характеристику диода, включённого в «прямом» направлении.

Проанализируйте, как меняется сопротивление *p-n*-перехода диода при изменении величины напряжения, подаваемого на переход.

Фотоэлемент. Обратите внимание (рис. 140, 141), *p-n*-переход полупроводникового диода находится в непрозрачном для света корпусе. И это, как вы понимаете, неспроста – полупроводниковые материалы чувствительны к световому воздействию. Этот «недостаток» полупроводников является основой работы фотоэлементов. Полупроводниковые фотоэлементы – это устройства для прямого преобразования энергии светового излучения в электрическую энергию.

В качестве примера рассмотрим, как устроен кремниевый фотоэлемент (рис. 145). Основой фотоэлемента служит пластина кристаллического кремния *n*-типа 1 толщиной в десятые доли миллиметра.

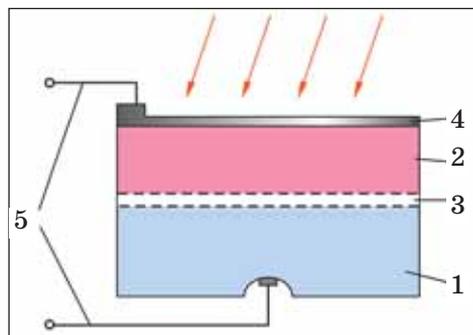


Рис. 145

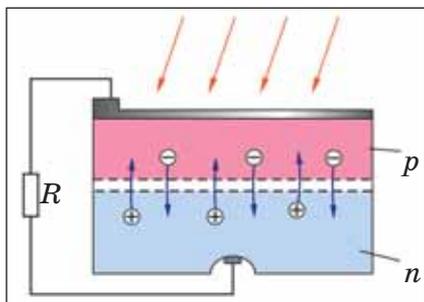


Рис. 146

На поверхности кремния путём диффузии бора или алюминия (акцепторные примеси) создаётся область кремния p -типа 2. Толщина этой области составляет не более тысячной доли миллиметра. На границе этой области с кристаллом кремния n -типа и образуется p - n -переход 3. Для создания электрического контакта на область кремния p -типа в вакууме напыляется металлическая плёнка 4, которая прозрачна для света. К металлической

плёнке и кристаллу кремния крепятся металлические контакты 5.

Каков принцип действия фотоэлемента (рис. 146)? При поглощении квантов света и в полупроводнике p -типа, и в полупроводнике n -типа происходит переход электронов из валентной зоны в зону проводимости. Таким образом, в обеих областях полупроводникового кристалла возникают дополнительные свободные носители заряда – электроны и дырки.

Дырки, образовавшиеся в p -области, не могут миновать p - n -переход – им препятствует электрическое поле запирающего слоя p - n -перехода $\vec{E}_{зап}$. Но неосновные носители заряда в полупроводнике p -типа – электроны – могут миновать p - n -переход. Аналогичная картина для неосновных носителей заряда в полупроводнике n -типа – дырок: они также могут преодолеть переход. Таким образом, на одном полюсе «батарейки» – полупроводнике p -типа – скапливаются «плюсы», на другом полюсе «батарейки» – полупроводнике n -типа – скапливаются «минусы». И если подключить к фотоэлементу резистор, то в цепи будет идти ток, который поддерживается источником тока – фотоэлементом. ЭДС фотоэлемента невелика, она не может превышать разности потенциалов на запирающем слое p - n -перехода и составляет доли вольта. Однако, соединяя фотоэлементы последовательно, получают солнечные батареи, которые являются источником электрической энергии на космических станциях, в устройствах автоматики, для работы которых необходим автономный источник энергии, и в других приборах.



Транзистор. Транзистор – наиболее распространённый прибор современной электроники. Транзисторы, вытеснив вакуумные лампы, со второй половины XX века стали основными элементами радиотехнических устройств того времени. Первоначально каждый из транзисторов изготавливался в отдельном – индивидуальном – корпусе (рис. 147).

Следующий принципиальный шаг – создание *интегральных схем* – систем, состоящих из множества транзисторов, диодов, конденсаторов, резисторов, изготавливаемых одновременно на одном полупроводниковом кристалле путём проведения многооперационного технологического процесса. Первая интегральная схема (1961 г.) содержала 4 транзистора и 2 резистора – всего 6 элементов (рис. 148). В 1965 году интегральная схема (ИС) содержала 30 элементов, в 1970 году – 1000, в 1975 году – 65 000 элементов. К 1982 году число компонентов ИС возросло до 200 000, к 1989 году – до 1 400 000, к 2002 году – до 55 000 000, к 2011 году – до 3,9 млрд и так далее. Таковы впечатляющие темпы развития нового раздела электроники – *микроэлектроники*. Зачем же нужны столь сложные интегральные схемы? В современных вычислительных устройствах (цифровых устройствах) обработка информации осуществляется, как вы знаете, в двоичной системе счисления. «Переводя» на язык электроники, это означает: логический «0» – отсутствие электрического сигнала, логическая «1» – наличие электрического сигнала. Поэтому элементной базой современных ЭВМ и являются интегральные схемы – устройства, позволяющие осуществить обработку электрических сигналов.

Основным же элементом интегральной схемы является транзистор – полупроводниковый элемент, способный преобразовывать электрические сигналы. Существует два типа транзисторов – биполярные транзисторы и полевые транзисторы.

Далее мы рассмотрим устройство и принцип действия так называемого биполярного транзистора с двумя *p-n*-переходами (рис. 149).



Рис. 147

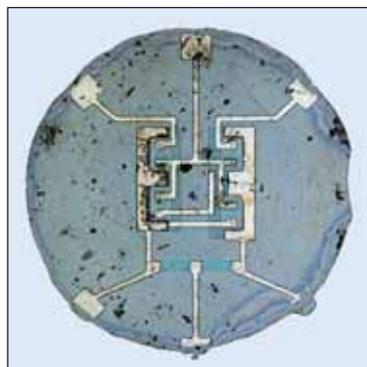


Рис. 148

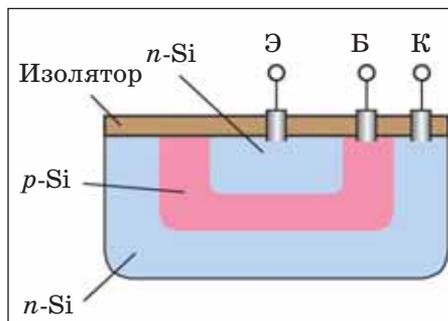


Рис. 149

Транзистор содержит три области, отличающиеся типом проводимости и концентрацией примеси: *эмиттер Э*, *базу Б*, *коллектор К*. Эмиттер *Э* является полупроводником *n*-типа, база *Б* – полупроводником *p*-типа, а коллектор *К* – полупроводником *n*-типа. Такой транзистор содержит два электронно-дырочных перехода: эмиттер – база и база – коллектор и называется *n-p-n*-транзистором. Возможен и иной вариант чередования областей в структуре транзистора, такой прибор называют *p-n-p*-транзистором. Условные обозначения транзисторов приведены на рисунке 150.

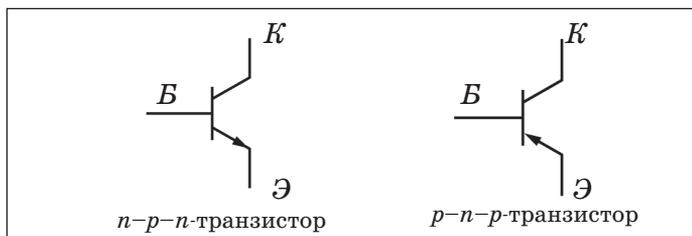


Рис. 150. Условные обозначения биполярных транзисторов

Рассмотрим ключевой режим работы транзистора, который используется в цифровых устройствах. Режим работы называется ключевым, потому что транзистор выполняет роль электронного «ключа», «закрывая» и «размыкая» цепь. Пусть *p-n-p*-транзистор включён в электрическую цепь (рис. 151, *а*) и пусть на вход – между эмиттером и базой – напряжение не подано (логический «0»). На выходе – между эмиттером и коллектором – напряжение будет равно напряжению источника (логическая «1»). При этом ток через транзистор идти не будет, так как эмиттерный переход (эмиттер – база) находится в открытом состоянии, а коллекторный переход (коллектор – база) закрыт (рис. 151, *а*). На этом переходе сохранился запирающий слой, сопротивление перехода велико, и по этой причине ток через транзистор не идёт.

Лампа, включённая в цепь коллектора, светиться не будет, напряжение на лампе равно нулю.

Подадим на вход (между эмиттером и базой) напряжение (логическая «1») так, чтобы на базу приходился более низкий потенциал («минус») относительно эмиттера (рис. 151, *б*). Электрическое поле, созданное между эмиттером и базой, «затягивает» дырки – основные носители тока в эмиттере – в базу. База – область с проводимостью *n*-типа, и часть дырок, попавших из эмиттера в базу, встречает в базе электроны и «выбывает из игры» в качестве свободных носителей заряда.

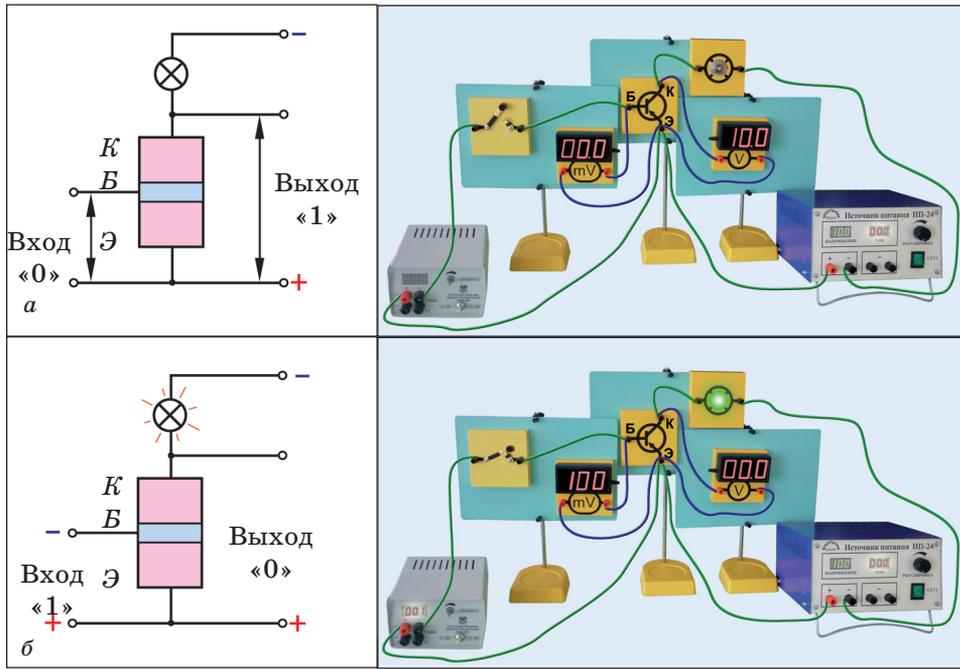


Рис. 151

Но при изготовлении транзистора базу специально выполняют тонкой геометрической областью и концентрацию донорной примеси в базе делают не очень высокой. Поэтому большинство дырок, «растекаясь» – диффундируя по базе, – достигают коллекторного перехода (перехода между базой и коллектором). Этот $p-n$ -переход «база – коллектор» находится в закрытом состоянии для электронов – основных носителей тока в базе. Но не для дырок, попавших в базу из эмиттера! Дырки «подхватываются» электрическим полем коллекторного перехода, и через транзистор в итоге идёт ток.

Лампа, включённая в цепь коллектора, светится, напряжение на лампе будет значительно, а на выходе (эмиттер – коллектор), сопротивление которого теперь невелико, напряжение станет практически равно нулю (логический «0»).

Таким образом, электрический сигнал на входе транзистора «включает» и «выключает» электрический сигнал на выходе транзистора. Применение подобных схем и обеспечивает быстрое действие современных ЭВМ.

***p-n*-Переход, физические процессы, обуславливающие одностороннюю проводимость *p-n*-перехода, устройство полупроводникового диода, вольт-амперная характеристика диода, устройство фотоэлемента, транзистор, ключевой режим транзистора, интегральные схемы.**

27.1 ● Оцените напряжённость электрического поля запирающего поля в германии, считая поле однородным, если разность потенциалов на *p-n*-переходе 0,7 В, а толщина запирающего слоя 8,5 мкм.

27.2 ● Диод и резистор сопротивлением 430 Ом соединены последовательно и подключены к источнику тока (рис. 152). При измерении напряжения на диоде вольтметр показывает напряжение 0,2 В. Какое напряжение покажет вольтметр, когда его подключат к резистору? Чему равна ЭДС источника? Внутренним сопротивлением источника можно пренебречь. Вольт-амперная характеристика диода приведена на рисунке 142.

27.3 ● При включении в электрическую цепь *p-n-p*-транзистора (рис. 153) сила тока, протекающего через эмиттер, 10,2 мА, сила тока через коллектор 9,7 мА. Чему равна сила тока через базу?

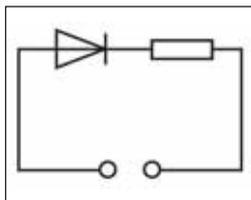


Рис. 152

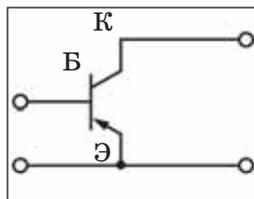


Рис. 153

Самое важное в разделе «Электрические явления»

1. В природе существуют электрически заряженные частицы.
Электрический заряд измеряют в кулонах (Кл).

Заряд электрона $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Вокруг электрических зарядов существует электрическое поле.

Силовая характеристика поля – *напряжённость электрического поля*.

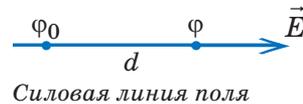
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$$

Энергетическая характеристика поля – потенциал электрического поля.

$$\varphi = \frac{W}{q}, \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В}.$$

Разность потенциалов

$$U = \varphi_0 - \varphi.$$



Связь между напряжённостью и потенциалом для случая однородного поля:

$$E = \frac{U}{d}, \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

При перемещении заряда электрическое поле совершает работу

$$A = qU.$$

2. Конденсатор – прибор для накопления заряда.

Емкость

$$C = \frac{q}{U}, \text{ фарад, } \Phi = \text{Кл/В}.$$

Емкость плоского конденсатора $C = f(\epsilon, \frac{s}{d})$.

Конденсаторы соединяют

- параллельно: $C = C_1 + C_2 + \dots$
- последовательно: $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$

Электрическое поле обладает энергией.

$$W = \frac{CU^2}{2}.$$

3. Электрический ток – упорядоченное движение заряженных частиц.

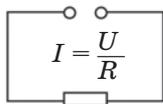
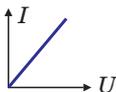
Сила тока

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}, \text{ Кл} = \text{А} \cdot \text{с.}$$

Основной закон электротехники – закон Ома

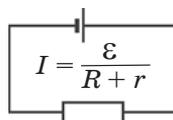
для участка цепи

$$I \sim U.$$



для полной цепи

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q}, \text{ В.} \quad \text{Должны действовать сторонние силы}$$



Проводники соединяют

последовательно: $R = R_1 + R_2 + \dots$

параллельно: $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$

Электрическим током (электрическим полем) совершается работа.
Мощность тока

$$P = UI, \text{ ватт, Вт.}$$

4. Электрический ток протекает в различных средах

Вакуум

Металлы

Газы

Электролиты

Полупроводники

вакуумные
электроприборы

проводники
нагревательные
элементы

электросварка
люминесцентные
лампы

электролиз

современная
микроэлектроника

II.1 ● Вблизи поверхности Земли напряжённость электрического поля Земли равна 130 В/м. Оцените разность потенциалов между двумя точками, расположенными по вертикали на расстоянии, равном росту человека.



II.2. Выясните, что такое электрокардиограмма и как её получают.

II.3. Сила тока в электрической цепи равномерно нарастает от 2 до 4 А за 30 с. Какой заряд проходит по электрической цепи за время изменения тока?

II.4 ● На рисунке 154 изображена схема участка электрической цепи. Все резисторы имеют одинаковое электрическое сопротивление, равное R . Чему равно сопротивление данного участка цепи?

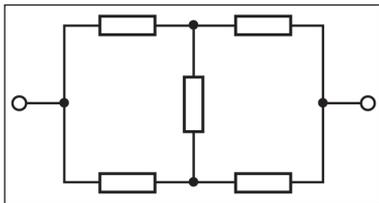


Рис. 154

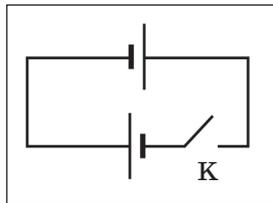


Рис. 155

II.5 ● Два источника с ЭДС 1,5 и 4,5 В, имеющие внутреннее сопротивление 0,1 и 0,5 Ом соответственно, соединили так, как это показано на рисунке 155. Какова будет сила тока в цепи в первоначальный момент после замыкания ключа К в цепи? Сопротивлением соединительных проводов и контактов ключа К пренебречь.

P. S.



После изучения данного раздела многие из известных вам и ранее понятий – электрический заряд, электрическое поле, электрический ток – наполнились более глубоким физическим содержанием.

Однако хотелось бы обратить внимание и на то, как много вопросов ещё не изучалось.

– Вам известны характеристики электрического поля, но не рассматривалось, например, как *провести расчёт напряжённости электрического поля, создаваемого системой зарядов – заряженным шаром, плоскостью, нитью.*

– Вы знаете, что электрическое поле в веществе отлично от электрического поля в вакууме. Но не изучалось, *какие процессы происходят в веществе, помещённом в электрическое поле, как на эти процессы влияет тепловое движение частиц вещества.*

– Был изучен закон Ома для полной цепи, но не рассматривались *методы расчёта сложных электрических цепей, со смешанным соединением элементов и содержащих в своём составе несколько источников ЭДС.*

– Рассмотрены физические процессы, приводящие к возникновению тока в различных средах. Но не изучалось множество различных аспектов этих процессов: *каковы законы электролиза, какова вольт-амперная характеристика газового разряда, каковы методы получения определённых параметров полупроводников и полупроводниковых приборов* и так далее.

Раздел 3. Основы магнетизма

В этом разделе вы углубите свои знания о магнитном поле. Вы узнаете, какой величиной характеризуется магнитное поле, как провести расчёт силы, с которой магнитное поле действует на движущуюся заряженную частицу или проводник с током.



Вспомните, что вам известно об основных свойствах магнитного поля, о характере движения заряженной частицы и о практическом применении явления действия магнитного поля на проводник с током.

§ 28. Магнитное поле

Магнитное взаимодействие

Вектор магнитной индукции

Лабораторная работа

«Изучение магнитного поля»

Магнитные свойства вещества

§ 29. Сила Лоренца

Сила, действующая на заряд, движущийся в магнитном поле

Примеры решения задач

Практическое применение силы Лоренца

§ 30. Сила Ампера

Вывод формулы силы Ампера

Лабораторная работа

«Изучение силы Ампера

и определение магнитной индукции постоянного магнита»

Практическое применение силы Ампера

Самое важное в разделе «Основы магнетизма»

P. S.

§ 28. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ



Термин «магнитное поле» введён в 1845 г. Майклом Фарадеем.

Из физической энциклопедии

Вам уже известны основные свойства магнитного поля.

Магнитное взаимодействие. Активное изучение магнитных явлений в современной науке ведёт своё начало со знаменитого открытия, сделанного датским физиком Хансом Кристианом Эрстедом (1777–1851) в 1820 году. Им было обнаружено магнитное действие электрического тока: если проводник, по которому идёт ток, расположить над магнитной стрелкой, то стрелка поворачивается, располагаясь перпендикулярно проводнику (рис. 156).

Следующий значительный вклад в изучение электромагнетизма был сделан французским учёным Андре Мари Ампером (1775–1836).

Ампер впервые установил, что два проводника, по которым идёт ток, в зависимости от направления токов притягиваются или отталкиваются (рис. 157, а, б).

Ампер особо подчёркивал, что «эти притяжения и отталкивания существенно отличаются от тех, которые вызываются электричеством в состоянии покоя» (то есть кулоновского взаимодействия).

Ампером также была высказана смелая научная гипотеза, объяснявшая магнитные свойства различных веществ некими токами, циркулирующими в веществе. В отличие от первой четверти XIX века, в наше время, когда известно, что в атомах электроны движутся вокруг ядра, это утверждение кажется практически очевидным.

Таким образом, все «разновидности» магнитного взаимодействия – «магнит – магнит», «электрический ток – магнит», «ток – ток» – обусловлены взаимодействием движущихся электрических зарядов.



Рис. 156

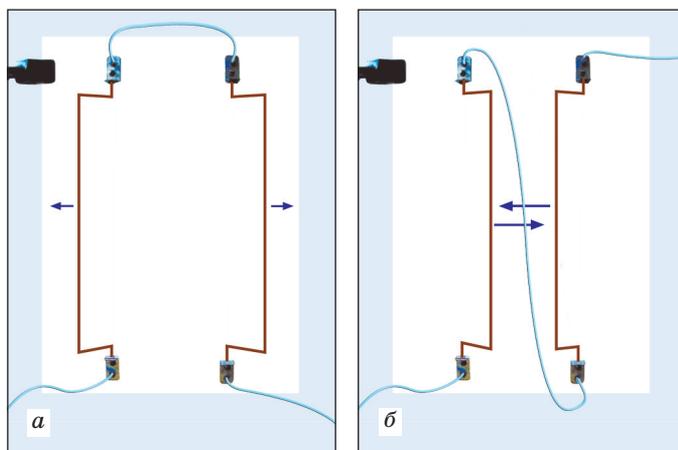


Рис. 157

а – отталкивание двух подвижных полурамок, по которым идут противоположно направленные токи;
б – притяжение двух подвижных полурамок, по которым идут токи одного направления

Но почему существует силовое взаимодействие движущихся электрических зарядов? Ответ на этот вопрос был дан трудами выдающегося английского физика Майкла Фарадея (1791–1867). Им была высказана идея о существовании магнитного поля, в дальнейшем эта идея получила ранг научного факта.

Основные свойства магнитного поля таковы:

- магнитное поле существует вокруг движущихся зарядов (электрического тока),
- магнитное поле действует с силой на движущиеся заряды (электрический ток).

Вектор магнитной индукции. Одной из характеристик магнитного поля является величина, называемая *вектором магнитной индукции* (или просто магнитной индукцией). Поднесём к экрану осциллографа разные по «силе» магниты – мы будем наблюдать, что при одних и тех же условиях смещение электронного луча под действием разных магнитов различно (рис. 158). Чем больше сила, действующая со стороны магнитного поля на движущийся заряд, тем больше магнитная индукция¹.

¹ Развёрнутое определение вектора магнитной индукции в учебнике не приводится.

Вектор магнитной индукции обозначается буквой B . Единица магнитной индукции в СИ – тесла (сокращённо обозначается Тл). Так единица измерения магнитной индукции названа в честь известного изобретателя в области электро- и радиотехники Никола Тесла (1856–1943).

Направление вектора магнитной индукции определяется следующим образом. Пусть магнитное поле создаётся круговым витком с током (рис. 159). Представим, что мы вращаем буравчик (правый винт) так, что направление вращения рукоятки буравчика совпадает с направлением тока в витке. Тогда перемещение самого буравчика совпадает с направлением вектора магнитной индукции.



28.1. Как должен быть направлен ток в катушке, чтобы им создавалось магнитное поле, вектор индукции которого имел бы такое направление, как на рисунке 160?

Как определить направление индукции магнитного поля, если оно создаётся прямым проводником с током? Будем вращать буравчик так, чтобы направление его поступательного движения совпадало с направлением тока (рис. 161). Тогда направление вращения буравчика укажет направление вектора магнитной индукции тока.

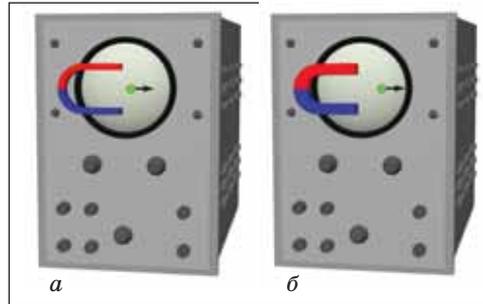


Рис. 158. Действие магнитного поля на движущийся заряд:

a – действие «слабого» магнитного поля;
 b – действие «сильного» магнитного поля.

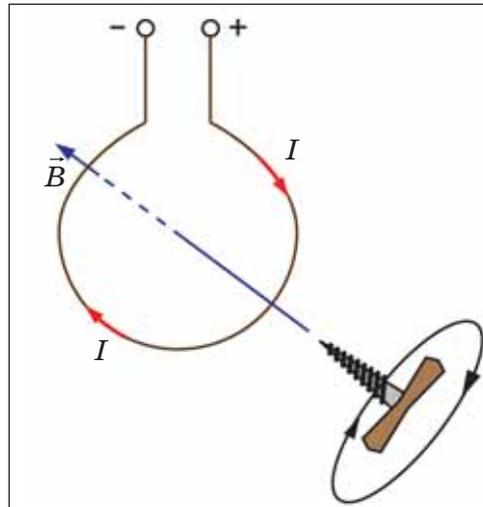


Рис. 159

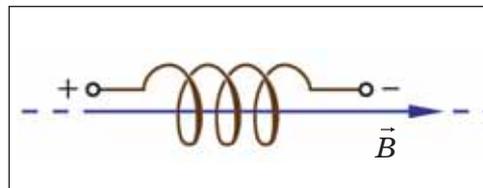


Рис. 160

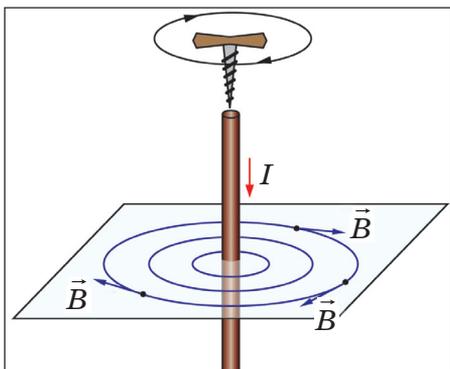


Рис. 161

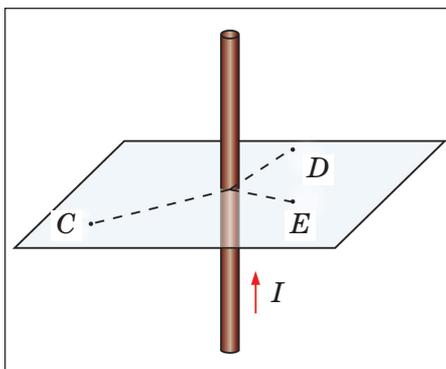


Рис. 162



28.2. Как будет направлена магнитная индукция в точках С, D, E в случае, если ток направлен так, как это показано на рисунке 162? Одинакова ли будет величина магнитной индукции в указанных точках?



Рис. 163

Направление магнитной индукции также можно определить, имея магнитную стрелку. В магнитном поле стрелка ориентируется таким образом, что направление от её южного полюса к северному полюсу совпадает с направлением вектора магнитной индукции (рис. 163).

Наглядно представить магнитное поле помогают так называемые *силовые линии*. Силовые линии магнитного поля – это линии, касательные к которым в каждой точке пространства совпадают по направлению с вектором магнитной индукции. На рисунке 164, а, б в качестве примера изображены силовые линии магнитной индукции поля постоянного магнита и катушки с током.

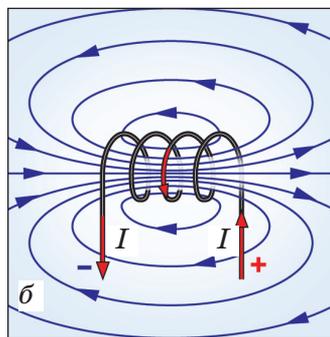
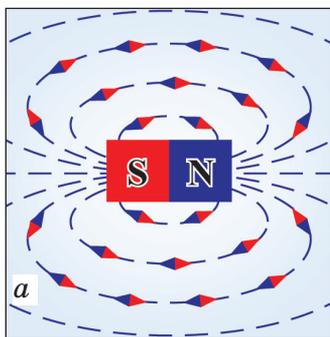


Рис. 164

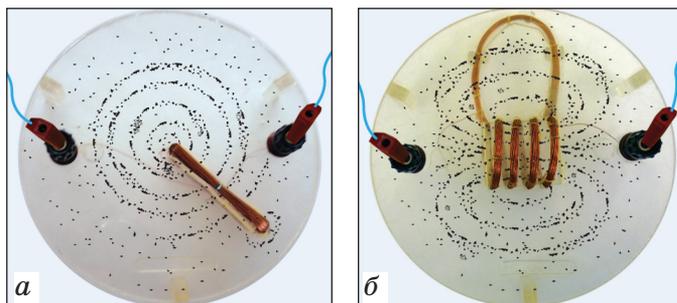


Рис. 165.

а – силовые линии магнитной индукции магнитного поля прямого проводника с током;

б – силовые линии магнитной индукции магнитного поля катушки с током. Внутри катушки поле однородно – силовые линии параллельны друг другу

Используя мелкие железные опилки, которые в магнитном поле, как магнитные стрелки, «выстроятся» вдоль силовых линий магнитного поля, можно определить вид силовых линий магнитной индукции (рис. 165, *а*, *б*).

Обратите внимание на одно принципиальное отличие силовых линий магнитного поля от силовых линий электростатического поля. Силовые линии электростатического поля всегда не замкнуты. Они начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных. Силовые линии магнитного поля всегда замкнуты. Это отражает тот факт, что по современным научным представлениям в природе не существует магнитных зарядов, подобных электрическим зарядам. Магнитное поле порождается не магнитными зарядами, а существует вокруг движущихся заряженных частиц¹.

Лабораторная работа «Изучение магнитного поля».

Оборудование: источник тока, амперметр, реостат, катушка-моток, ключ, соединительные провода, нить, штатив, магнит, деревянная линейка, компас, кусочки ластика.

Указания к работе:



Задание 1. Проверка правила определения направления магнитного поля – правила буравчика.

– Подсоедините катушку-моток к источнику тока, включив последовательно с ней реостат и амперметр.

¹ Переменное магнитное поле возникает также при изменении во времени электрического поля. В свою очередь, при изменении во времени магнитного поля возникает электрическое поле (явление электромагнитной индукции).

– Подвесьте катушку-моток на нити к штативу так, чтобы провода, подводящие ток, не стесняли движения катушки.

– Подайте в катушку ток и, используя правило буравчика, определите направление магнитного поля, создаваемого катушкой-мотком. Поднесите к плоскости катушки поочередно северный и южный полюсы магнита.

– Поднесите полюсы магнита к катушке с другой стороны. Проверьте, позволило ли применение правила буравчика верно определить направление вектора магнитной индукции магнитного поля катушки-мотка с током. (Учтите, что одноимённые магнитные полюсы – северный и северный, южный и южный – отталкиваются, а разноимённые – притягиваются.) Сделайте схематические рисунки, поясняющие проведённые опыты.

– Измените направление тока в катушке-мотке и повторите соответствующие опыты.



Задание 2. Изучение зависимости величины магнитной индукции поля катушки-мотка от силы тока в катушке.

Закрепите горизонтально на небольшой высоте в лапке штатива деревянную линейку. С помощью кусочков ластика укрепите на линейке в вертикальной плоскости катушку-моток и рядом с катушкой поставьте компас (рис. 166, а).

Расположите компас так, чтобы первоначально стрелка компаса была ориентирована вдоль плоскости катушки по направлению горизонтальной

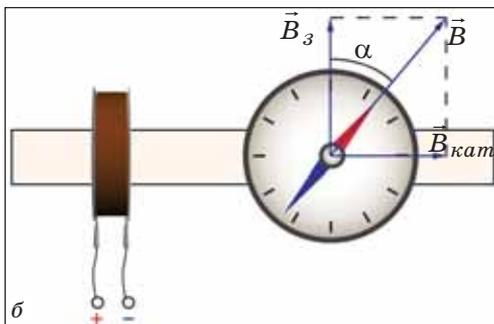
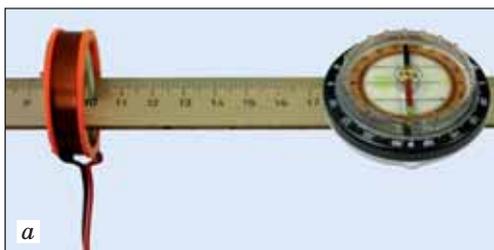


Рис. 166

составляющей магнитной индукции поля Земли \vec{B}_z (рис. 166, б).

Если замкнуть цепь и создать ток в катушке-мотке, то вокруг катушки возникнет магнитное поле, вектор магнитной индукции которого $\vec{B}_{кат}$ перпендикулярен плоскости катушки-мотка.

При этом стрелка компаса повернётся на некоторый угол α от своего первоначального положения, ориентируясь по суммарному магнитному полю, вектор магнитной индукции \vec{B} которого равен

$$\vec{B} = \vec{B}_z + \vec{B}_{кат}.$$

Так как угол между векторами \vec{B}_z и $\vec{B}_{кат}$ равен 90° , то в прямоугольном треугольнике тангенс угла отклонения стрелки компаса равен

Отсюда

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_{\text{кат}}}{B_3}.$$

$$B_{\text{кат}} = B_3 \operatorname{tg} \alpha.$$

Следовательно, величину магнитной индукции поля катушки-мотка в данной лабораторной работе можно измерить не в единицах СИ тесла, а в условных единицах $\operatorname{tg} \alpha$.

Измерьте угол отклонения стрелки компаса при различных значениях силы тока в катушке-мотке. Данные занесите в таблицу.

Номер опыта	1	2	3	4	5	6
Сила тока в катушке-мотке I , А						
Угол отклонения стрелки компаса α , °						
Тангенс угла отклонения стрелки компаса, $\operatorname{tg} \alpha$						

Начертите график зависимости магнитной индукции поля катушки-мотка от силы тока в ней. При построении графика по горизонтальной оси отложите значения силы тока (в амперах), а по вертикальной оси – значения магнитной индукции поля катушки-мотка (в условных единицах $\operatorname{tg} \alpha$).

Сделайте вывод, как зависит величина магнитной индукции от силы тока в катушке-мотке.

Магнитные свойства вещества. Все вещества, в атомах и молекулах которых происходит движение электронов, не могут не обладать магнитными свойствами. У разных веществ эти магнитные свойства проявляются неодинаково.

При помещении любого вещества во внешнее магнитное поле всегда имеет место незначительное ослабление магнитной индукции внешнего поля магнитным полем, возникающим у атомов вещества. Это происходит в полном соответствии с правилом Ленца: возникающие «индукционные микротоки», обусловленные движением электронов в оболочках атомов, должны компенсировать причину своего появления – внешнее магнитное поле. Если же атомы вещества изначально обладают за счёт движения электронов магнитными полями, то дополнительно происходит ориентация этих микрополей по направлению внешнего магнитного поля. Как результат, происходит незначительное усиление магнитной индукции внешнего магнитного поля.

Рассмотренные примеры слабوماгнитных свойств представляют в основном научный интерес. Но имеются и группы сильномагнитных веществ (например, железо, никель, кобальт, некоторые сплавы), которые находят широкое практическое применение.

Эти вещества называются *ферромагнетиками*. Отличительные особенности ферромагнетиков: *во-первых*, они в сотни, тысячи, десятки тысяч раз усиливают магнитную индукцию внешнего поля, *во-вторых*, ферромагнетики могут сохранять состояние намагниченности и быть постоянными магнитами.

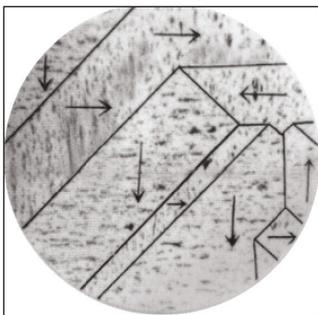


Рис. 167

Удивительные свойства ферромагнетиков объясняются их внутренним строением. Ферромагнетиками являются только вещества в твёрдом кристаллическом состоянии, в которых благодаря определённым особенностям электронной оболочки атомов и структуры кристаллической решётки возникают области самопроизвольного намагничивания – их называют *доменами*. Размеры доменов, как правило, около сотой доли миллиметра (но могут достигать миллиметра), и они объединяют сотни тысяч атомов.

Домены можно наблюдать в оптический микроскоп, используя метод порошковых фигур: на тщательно отполированную поверхность ферромагнетика наносится тонкий слой жидкости, в котором находятся мельчайшие частицы ферромагнитного порошка; частицы порошка оседают преимущественно на границах доменов (рис. 167, стрелками указано направление магнитного поля, создаваемого доменами).

В естественном состоянии векторы магнитной индукции отдельных доменов ориентированы произвольно – ферромагнетик не намагничён. Поместим ферромагнетик во внешнее магнитное поле, например, расположим железный сердечник в катушке с током. Под действием внешнего магнитного поля растут те домены, которые ориентированы по полю. Происходит переориентация этих доменов, в которых первоначально направление магнитного поля не совпадало с направлением внешнего поля (рис. 168, а, б).

В результате ферромагнетиком создаётся магнитное поле, индукция которого в тысячи, десятки тысяч раз больше индукции внешнего поля намагничивания. (Вероятно, мы должны быть признательны природе, которая «подарила» нам ферромагнетики. Представьте, как ужасно выглядели бы электромагниты, трансформаторы, генераторы, в обмотках которых для создания необходимой величины индукции магнитного поля потребовалось бы делать в тысячи, десятки тысяч больше витков, чем это делается при наличии ферромагнитных сердечников.)

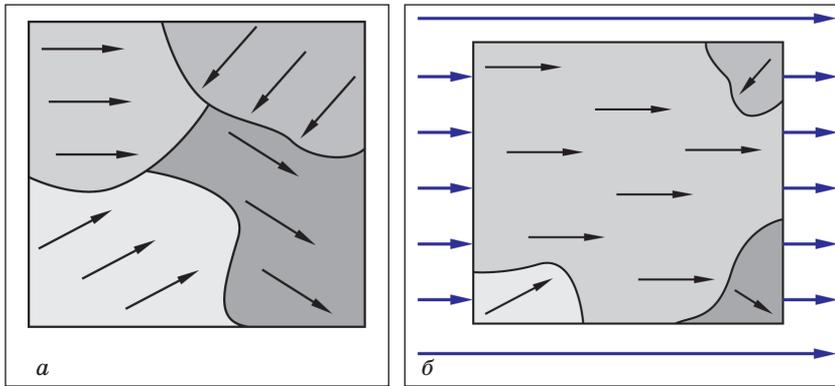


Рис. 168. Модель доменного строения ферромагнетиков. Стрелками показаны направления векторов магнитной индукции доменов: *а* – в естественном состоянии магнитные поля доменов ориентированы произвольно; *б* – при намагничивании магнитные поля доменов ориентированы по внешнему магнитному полю

После того, как внешнее магнитное поле «зануляют» (выключают ток в катушке), ориентация большинства доменов сохраняется, ферромагнетик сохраняет остаточную намагниченность. Так остаточная намагниченность превращает ферромагнетики в источники магнитного поля – постоянные магниты.



28.3. Как можно размагнитить постоянный магнит?

Ферромагнитные свойства существуют только ниже определённой температуры вещества. Для железа, например, эта критическая температура составляет $768\text{ }^{\circ}\text{C}$, для никеля $358\text{ }^{\circ}\text{C}$. Выше критической температуры энергия теплового движения атомов так велика, что происходит разрушение доменной структуры, и у вещества остаются только слабомагнитные свойства.



28.4. Как, имея в своём распоряжении магнит, стальную иголку, штатив, нить и спички, доказать существование критической температуры у ферромагнетиков?

Магнитное поле и его основные свойства, вектор магнитной индукции, единица измерения вектора магнитной индукции – тесла (Тл), правило для определения направления вектора магнитной индукции (правило буравчика), силовые линии магнитного поля, магнитные свойства вещества, ферромагнетики, доменная структура ферромагнетиков.

28.1 ● В вашем распоряжении имеется реостат, ключ, соединительные провода, компас и лабораторный источник тока, вблизи клемм которого отсутствуют знаки «+», «-» или «~». Предложите способ, который позволил бы определить, источником постоянного или переменного тока является прибор.

28.2 ● По плоскому замкнутому проводнику идёт ток (рис. 169). Определите направление вектора магнитной индукции в точках А и В.

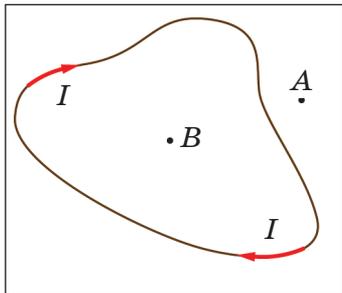


Рис. 169

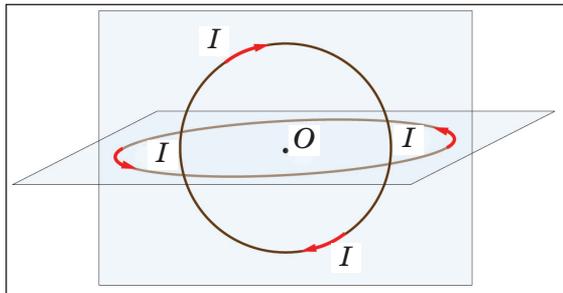


Рис. 170

28.3 ● В некоторой точке на поверхности Земли горизонтальная составляющая магнитной индукции магнитного поля Земли равна 19 мкТл , а вертикальная составляющая 57 мкТл . Чему равен модуль вектора магнитной индукции магнитного поля Земли в данной точке?

28.4 ● По двум одинаковым кольцевым проводникам, изолированным друг от друга и расположенным так, что их плоскости взаимно перпендикулярны (рис. 170), проходят одинаковые токи. Магнитная индукция в точке О – общем центре двух кольцевых проводников – составляет 51 мкТл .

Укажите направление и величину магнитной индукции магнитного поля, создаваемого каждым из проводников. Магнитное поле Земли не учитывать.

28.5 ● На длинный стальной стержень от штатива надевают катушку от электромагнита и присоединяют её длинными проводами к зажимам гальванометра (рис. 171).

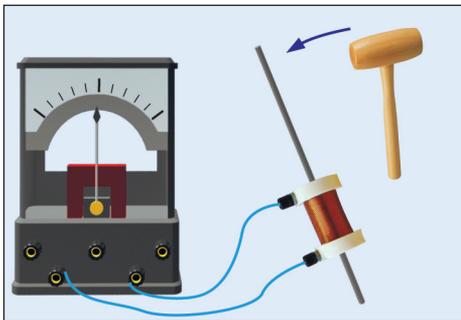
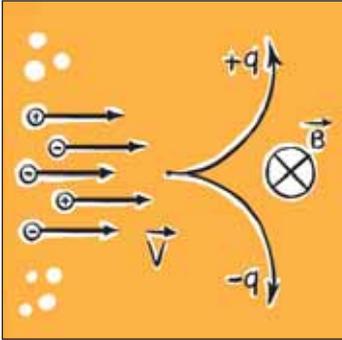


Рис. 171

Взяв в левую руку стержень вместе с катушкой, располагают его вдоль силовых линий магнитного поля Земли и ударяют по стержню деревянным молотком. При этом стрелка гальванометра отклоняется. При втором ударе стрелка отклоняется слабее, а при последующих ударах отклонение стрелки не наблюдается. Как объяснить наблюдаемое явление? Какие опыты с имеющимся оборудованием вы предложили бы провести в качестве подтверждения данного вами объяснения?

§ 29. СИЛА ЛОРЕНЦА



Его блестящий ум указал нам путь от теории Максвелла к достижениям физики наших дней. Именно он заложил краеугольные камни этой физики, создал её методы...

Образ и труды его будут служить на благо и просвещение ещё многих поколений.

*Из речи Альберта Эйнштейна,
посвящённой памяти Хендрика Антона Лоренца*

Вы уже знаете, что магнитное поле действует на движущуюся заряженную частицу.

Сила, действующая на заряд, движущийся в магнитном поле.

Прямоугольную рамку, на которую намотано несколько десятков витков провода, разместим рядом с осциллографом (рис. 172). Если по проводу рамки пропустить ток, то он будет являться источником магнитного поля, действующего на электроны, движущиеся в электронно-лучевой трубке осциллографа.

Включим осциллограф. Поток электронов, ударяющихся изнутри в экран осциллографа, даёт светящуюся точку в центре экрана. Подадим ток в рамку, создав тем самым вокруг неё магнитное поле. Мы обнаружим, что под действием силы со стороны магнитного поля поток электронов смещается и светящаяся точка на экране осциллографа сдвигается влево или вправо (в зависимости от направления тока в рамке).

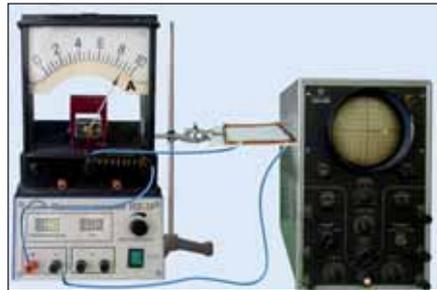


Рис. 172

На электроны, движущиеся в электронно-лучевой трубке осциллографа, действует в основном только магнитное поле, создаваемое током, проходящим по ближайшей к осциллографу стороне рамки. Этот ток создаёт магнитное поле, вектор магнитной индукции которого в тех точках, через которые пролетают электроны, направлен либо вертикально вниз, либо вертикально вверх. В этом легко убедиться, воспользовавшись правилом буравчика (рис. 173, а, б).

Опыт показывает, что направление силы, действующей со стороны магнитного поля на движущуюся заряженную частицу, перпендикулярно направлению скорости частицы и направлению вектора магнитной индукции поля.

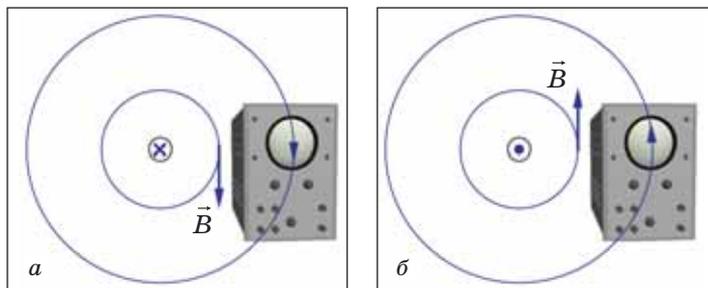


Рис. 173. Определение направления магнитной индукции поля, создаваемого проводником с током:

a – ток направлен от наблюдателя (это обозначено условным значком \otimes);

б – ток направлен к наблюдателю (это обозначено условным значком \odot).

Направление силы со стороны магнитного поля F_m , действующей на движущийся заряд, определяют по правилу левой руки (рис. 174).

Если ладонь левой руки расположить так, чтобы силовые линии магнитного поля входили в ладонь, а четыре пальца были направлены по движению положительного заряда (против движения отрицательного заряда), то отогнутый на 90° большой палец покажет направление силы, действующей на движущийся заряд со стороны магнитного поля.

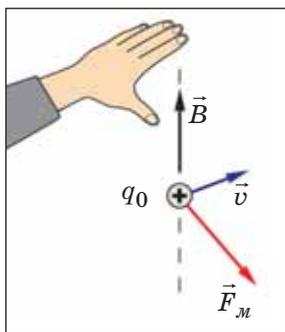


Рис. 174



29.1. Как в соответствии с правилом левой руки будет направлена сила, действующая со стороны магнитного поля на электроны, движущиеся в электронно-лучевой трубке осциллографа в случаях, изображённых на рисунке 173, *a*, *б*? (Учтите, что электроны – отрицательно заряженные частицы.) Подтверждается ли правило левой руки на опыте (рис. 172)?

Теперь необходимо выяснить, от чего зависит величина силы, действующей со стороны магнитного поля на движущийся заряд.



29.2. Могли бы вы высказать свои соображения о том, от чего зависит данная сила?

Продолжим опыты (рис. 172). Увеличим силу тока в рамке, тем самым увеличим индукцию магнитного поля. При этом светящаяся точка на экране осциллографа сдвигается больше – сила возросла.

Сила F_m , действующая на движущийся заряд, тем больше, чем больше величина магнитной индукции поля.

Ясно также, что величина силы зависит от величины скорости (если заряженная частица не движется, то магнитное поле на неё не действует, сила равна нулю). Опыт показывает, что сила F_m , действующая на движущийся заряд, тем больше, чем больше скорость заряженной частицы.

Повернём рамку так, чтобы вектор магнитной индукции \vec{B} составлял с вектором скорости движения электронов \vec{v} угол, меньший 90° (рис. 175, а). Сдвиг светящейся точки на экране становится меньше – сила уменьшается.

Когда угол α между вектором магнитной индукции \vec{B} и скоростью электронов \vec{v} равен 0° (или 180°), то сила равна нулю (рис. 175, б). Сила F_m , действующая на движущийся заряд, зависит от величины угла α между направлением вектора магнитной индукции поля \vec{B} и вектора скорости заряженной частицы \vec{v} .

Обобщение опытных фактов привело учёных к следующему выражению для расчёта величины силы, действующей на движущийся заряд в магнитном поле:

$$F_m = q_0 Bv \sin \alpha, \quad (29.1)$$

где q_0 – электрический заряд частицы.

 29.3. Выразите единицу измерения магнитной индукции тесла через единицы измерения СИ.

Эта формула для расчёта силы была предложена нидерландским физиком Хендриком Антоном Лоренцом (1853–1928), поэтому силу, действующую на движущуюся заряженную частицу в магнитном поле, в школьной учебной литературе часто называют силой Лоренца¹. В дальнейшем и мы будем использовать этот термин, понимая под силой Лоренца магнитную силу F_m , вычисленную по формуле (29.1).

¹ Общепринято силой Лоренца \vec{F}_L называть сумму сил, действующих на заряженную частицу и со стороны электрического поля $\vec{F}_э$, и со стороны магнитного поля \vec{F}_m : $\vec{F}_L = \vec{F}_э + \vec{F}_m$.

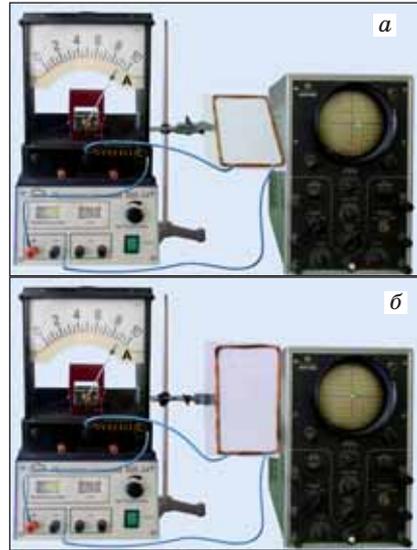
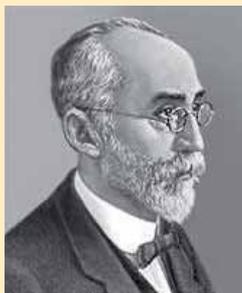


Рис. 175



Хендрик Антон Лоренц (1853–1928). Выдающийся нидерландский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии (совместно с нидерландским физиком Питером Зеemanом).

Создатель классической электронной теории, с помощью которой объяснил многие электрические и оптические явления. Разработал электродинамику движущихся сред.

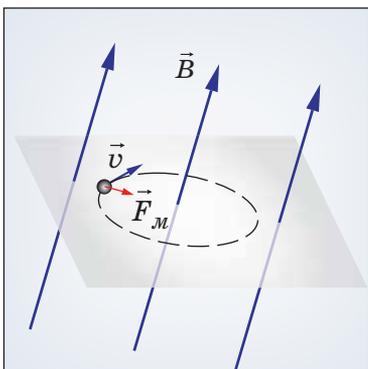


Рис. 176

Отметим одну принципиальную особенность силы Лоренца. Для простоты первоначально рассмотрим случай, когда заряженная частица влетает в магнитное поле перпендикулярно его силовым линиям (рис. 176).

Так как сила Лоренца \vec{F}_m перпендикулярна скорости частицы v , то под действием этой силы частица будет двигаться с центростремительным ускорением по окружности некоторого радиуса. При этом *направление скорости частицы меняется, а модуль скорости частицы и её кинетическая энергия постоянны.*

Если частица влетает в поле под некоторым углом к вектору магнитной индукции, то она по-прежнему будет двигаться в магнитном поле по окружности и одновременно частица смещается вдоль силовой линии. Как образно говорят о таком случае, частица движется, накручиваясь на силовую линию.

Примеры решения задач.

● **Задача 1.** Протон в магнитном поле индукцией $B = 50$ мТл описал окружность радиусом $r = 4,0$ см. Определите скорость протона. Чему равны период и частота вращения протона?

Решение:

Так как протон движется по окружности, то частица влетела в магнитное поле перпендикулярно вектору магнитной индукции ($\alpha = 90^\circ$). В этом случае сила Лоренца равна

$$F_m = q_0 B v, \quad (29.2)$$

где v – скорость протона;

q_0 – заряд протона, $q_0 = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл.

В соответствии со II законом Ньютона

$$m\vec{a} = \vec{F}_m,$$

где \vec{a} – ускорение протона;

m – масса протона, $m = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг.

Движение происходит с центростремительным ускорением a_u ,

$$a = a_u.$$

Тогда

$$ma_u = F_m. \quad (29.3)$$

Центростремительное ускорение можно выразить через скорость протона v и радиус окружности r , по которой движется протон:

$$a_u = \frac{v^2}{r}. \quad (29.4)$$

Из соотношений (29.2) – (29.4) имеем

$$\frac{mv^2}{r} = q_0 Bv. \quad (29.5)$$

Отсюда

$$v = \frac{q_0 B r}{m}. \quad (29.6)$$

Период T (время, за которое протон совершает один оборот) можно рассчитать, если пройденный протоном путь – длину окружности – разделить на его скорость.

То есть

$$T = \frac{2\pi r}{v},$$

или, с учётом (29.6),

$$T = \frac{2\pi m}{q_0 B}.$$

Частота вращения ν – величина, обратная периоду,

$$\nu = \frac{1}{T},$$

$$\nu = \frac{q_0 B}{2\pi m}.$$

Расчёты скорости, периода и частоты вращения протона проведите самостоятельно.

Действия с единицами измерений [для формулы (29.6)]:

$$\frac{\text{Кл} \cdot \text{Тл} \cdot \text{м}}{\text{кг}} = \frac{\text{Кл} \cdot \frac{\text{Н}}{\text{Кл} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}} \cdot \text{м}}{\text{кг}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}} \cdot \frac{\text{м}}{\text{кг}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{кг}} = \frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{с}}{\text{кг}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ: $v = 200$ км/с, $T = 1,3$ мкс, $\nu = 7,6 \cdot 10^5$ с⁻¹.



Задача 2. На рисунке 177 изображена схема простейшего масс-спектрографа, индукция магнитного поля в котором $B = 1,0$ Тл. В ионизаторе образуются ионы, которые ускоряются напряжением $U = 10$ кВ и вылетают через щель. После поворота в магнитном поле ионы попадают на фотопластинку и вызывают её потемнение. Какой должна быть ширина щели l , чтобы полосы – следы ионов на фотоплёнке $^{16}\text{O}^+$ и $^{15}\text{N}^+$ – разделились?

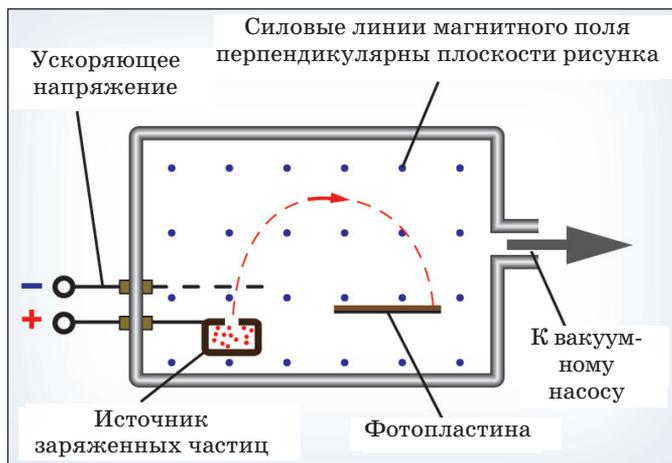


Рис. 177

Решение:

Вначале выясним, какой из однозарядных ионов – $^{16}\text{O}^+$ или $^{15}\text{N}^+$ – будет двигаться в магнитном поле по окружности большего радиуса.

Из соотношения (29.5)

$$\frac{mv^2}{r} = q_0 Bv$$

имеем

$$r = \frac{mv}{q_0 B}. \quad (29.7)$$

При определении скорости движения иона учтём, что им пройдено ускоряющее напряжение U , а значит, электрическим полем совершена работа A , равная

$$A = q_0 U,$$

где q_0 – заряд иона.

Благодаря работе электрического поля кинетическая энергия иона увеличивается. Если пренебречь начальной кинетической энергией иона, то конечная кинетическая энергия ускоренного иона E_k равна работе электрического поля A .

Но

$$E_{\kappa} = A.$$

$$E_{\kappa} = \frac{m_0 v^2}{2},$$

где m_0 – масса иона;

v – конечная скорость иона, с которой он и влетает в магнитное поле масс-спектрографа.

$$\frac{m_0 v^2}{2} = q_0 U.$$

Отсюда

$$v = \sqrt{\frac{2q_0 U}{m_0}}.$$

С учётом полученного выражения формула (29.7) примет вид

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2m_0 U}{q_0}}. \quad (29.8)$$

Из формулы (29.8) следует, что более массивные ионы кислорода будут двигаться по траектории большего радиуса, чем ионы азота. Изобразим траектории ионов (рис. 178, а, б), считая, что ионы вылетают строго перпендикулярно щели.

Из рисунка 178, а, б видно, что полосы ионов разделятся, если ширина щели l меньше разности диаметров траекторий ионов D и d .

$$l \leq D - d,$$

$$l \leq 2(r_{\text{кисл}} - r_{\text{азот}}),$$

где $r_{\text{кисл}}$ и $r_{\text{азот}}$ – радиусы траекторий ионов кислорода и азота соответственно.

С учётом выражения (29.8) имеем

$$l \leq \frac{2}{B} \sqrt{\frac{2U}{q_0}} (\sqrt{m_{\text{кисл}}} - \sqrt{m_{\text{азот}}}),$$

где $m_{\text{кисл}}$ и $m_{\text{азот}}$ – масса ионов кислорода и азота соответственно.

$$l \leq \frac{2}{1,0 \text{ Тл}} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^4 \text{ В}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}} (\sqrt{16 \cdot 1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ кг}} - \sqrt{15 \cdot 1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ кг}}),$$

$$l \leq 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}.$$

Ответ: $l \leq 3,7 \text{ мм}$.

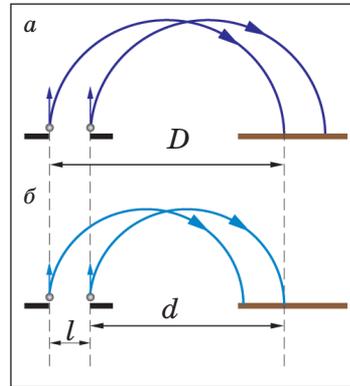


Рис. 178. Траектории ионов $^{16}\text{O}^+$ и $^{15}\text{N}^+$ в масс-спектрографе:

а – траектории ионов $^{16}\text{O}^+$;

б – траектории ионов $^{15}\text{N}^+$

Задача 3. Пусть в некоторой области пространства созданы постоянные однородные электрическое и магнитное поля, так что напряжённость электрического поля \vec{E} перпендикулярна вектору индукции магнитного поля \vec{B} . Такие поля называют скрещенными. Какую по величине начальную скорость должна иметь положительно заряженная частица и как эта скорость должна быть направлена, чтобы частица, влетев в скрещенные поля, двигалась прямолинейно?

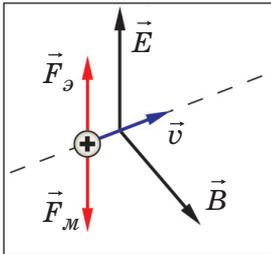


Рис. 179

Решение:

Пусть напряжённость электрического поля и вектор магнитной индукции направлены так, как это показано на рисунке 179.

Так как частица заряжена положительно, то направление и модуль силы, действующей на неё со стороны электрического поля $\vec{F}_э$, можно определить:

$$\vec{F}_э = \vec{E} q_0,$$

где q_0 – заряд частицы.

$$F_e = Eq_0. \quad (29.9)$$

На частицу, движущуюся в магнитном поле, действует сила Лоренца $\vec{F}_м$, вызывающая центростремительное ускорение и изменяющая направление скорости.

$$F_m = q_0 B v \sin \alpha, \quad (21.10)$$

где v – скорость частицы.

По требованию задачи в скрещенных полях частица должна двигаться прямолинейно. Это возможно только тогда, когда сила Лоренца $\vec{F}_м$ компенсируется силой, действующей на частицу со стороны электрического поля $\vec{F}_э$.

$$\vec{F}_м + \vec{F}_э = 0,$$

$$\vec{F}_м = -\vec{F}_э,$$

$$F_m = F_э. \quad (29.11)$$

(Так как равнодействующая сила равна нулю, то в соответствии со II законом Ньютона и ускорение частицы равно нулю. То есть если в скрещенных полях частица движется прямолинейно, то в таком случае её движение ещё и равномерное.)

Применив правило левой руки, можно установить, как должна быть направлена скорость частицы \vec{v} (рис. 179). Частица должна влететь в скрещенные поля под углом 90° к направлению напряжённости \vec{E} и магнитной индукции \vec{B} .

Осталось определить величину скорости частицы. Из соотношений (29.4) – (29.11) имеем

$$q_0 Bv = Eq_0$$

(здесь учтено, что $\alpha = 90^\circ$; $\sin 90^\circ = 1$).

Отсюда

$$v = \frac{E}{B}.$$

Действия с единицами измерений:

$$\frac{\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}}{\frac{\text{Тл}}{\text{Кл} \cdot \text{Тл}}} = \frac{\text{Н}}{\text{Кл} \cdot \text{Тл}} = \frac{\text{Н}}{\text{Кл} \cdot \frac{\text{Н}}{\text{Кл} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ: $v = \frac{E}{B}.$



29.4. Какое практическое применение зависимости, установленной при решении данной задачи, вы можете предложить?

Практическое применение силы Лоренца. Один из примеров практического применения силы Лоренца уже был рассмотрен при решении задачи 2 этого параграфа. Речь идёт о масс-спектрографе. *Масс-спектрографы* и *масс-спектрометры*¹ – приборы для разделения ионизированных частиц по их массам путём воздействия электрических и магнитных полей. Это позволяет определить массы частиц и процентное содержание частиц (спектр масс) в исследуемом веществе. Именно прецизионное (отличающееся высокой точностью) измерение масс ионов, проведённое с помощью масс-спектрографов, позволило установить существование изотопов. Также экспериментально был подтверждён дефект массы – разность между массой ядра и суммой масс протонов и нейтронов, составляющих ядро.



29.5. Существует три стабильных изотопа неона – ^{20}Ne , ^{21}Ne , ^{22}Ne . Каков состав ядер данных изотопов?



29.6. Как рассчитывается энергия связи $E_{св}$ по известному значению дефекта масс Δm ?

В наше время самые большие (и самые дорогостоящие) физические приборы – это *ускорители заряженных частиц*. В мощных ускорителях не обойтись без электромагнитов, которые являются источником магнитного поля. Под действием силы Лоренца заряженные частицы движутся в ускорителях по круговым орбитам.

¹ В масс-спектрометрах вместо фотографической регистрации имеется приёмник ионов, что позволяет измерить силу тока, создаваемого ионами.

Например, ускоренные протоны в Большом адронном коллайдере удерживаются на орбите в вакуумном 27-километровом кольце 1232 сверхпроводящими магнитами (рис. 180).



Рис. 180. Пятнадцатиметровый поворотный магнит спускают в шахту для установки на Большом адронном коллайдере



Рис. 181. Токамак Т-15 (Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»). Имеет сверхпроводящий магнит, дающий поле с индукцией 3,6 Тл. Ток плазмы – до 1 000 000 А

Одна из самых грандиозных задач, которая стоит перед современной наукой и техникой, – это овладение энергией термоядерного синтеза в мирных целях. Для управляемой термоядерной реакции перспективно использовать смесь изотопов водорода дейтерия ^2H и трития ^3H , слияние которых в ядра гелия ^4He с выделением колоссального количества энергии возможно при температуре в десятки миллионов кельвин.

Удержание высокотемпературного ионизированного вещества – плазмы – возможно с помощью магнитных стенок. Магнитное поле со специально подобранной конфигурацией силовых линий удерживает плазму в ограниченной области пространства, предохраняя стенки вакуумной камеры от непосредственного контакта с термоядерным «топливом». Идея магнитного удержания плазмы была разработана физиками Андреем Дмитриевичем Сахаровым (1921–1989) и Игорем Евгеньевичем Таммом (1895–1971). На основе их предложений были созданы *токамаки*. Токамак (тороидальная камера с магнитными катушками) – установка с кольцеобразной (тороидальной) вакуумной камерой, в которой протекает управляемая термоядерная реакция. Магнитное удержание плазмы осуществляется внешним магнитным полем и магнитным полем тока, протекающим по плазменному шнуру (рис. 181). Ток в плазме обеспечивает её разогрев и удержание плазменного шнура.

В настоящее время реализуется проект международного термоядерного реактора ITER, строительство которого ведётся на юге Франции. В создании этой установки, относящейся к токамакам, участвуют и учёные России. Создание этой установки, относящейся к токамакам, финансируют страны Европейского Союза, Индии, Китая, Кореи, России, США и Японии. Учёные России принимают активное участие в разработке ядерно-физических систем реактора, систем преобразования энергии, экспериментальных модулей и других направлений программы по освоению управляемого термоядерного синтеза (УТС).

На рисунке 182 показана схема реактора ITER.

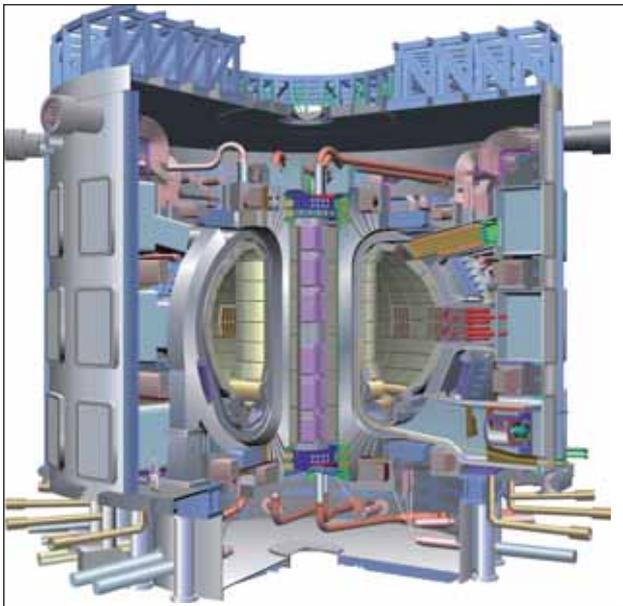


Рис. 182

Общий радиус конструкции	– 10,7 м
Высота	– 30 м
Объём плазмы	– 837 м ³
Магнитное поле	– 5,3 Тл
Максимальный ток в вакуумном шнуре	– 15 000 000 А
Средняя температура	– 100 000 000 К

Сила, действующая на заряд, движущийся в магнитном поле (сила Лоренца), $F_{\text{л}} = q_0 Bv \sin\alpha$, правило левой руки, характер движения заряженной частицы в магнитном поле, масс-спектрограф, ускорители заряженных частиц, реактор термоядерного синтеза – токамак.

29.1 ● Определите, какая сила действует на протон в магнитном поле, если модуль вектора магнитной индукции составляет 50 мТл. Скорость протона 30 000 км/с и направлена под углом 30° к силовым линиям магнитного поля.

29.2 ● Электрон влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно его силовым линиям (рис. 183). Изобразите примерный вид дальнейшей траектории электрона. Ответ обосновать.

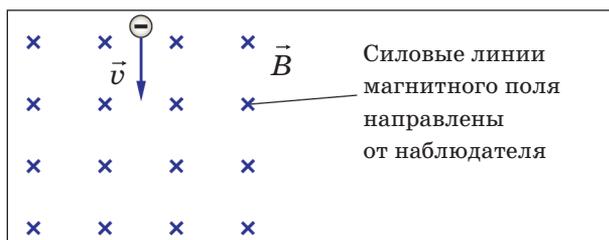


Рис. 183

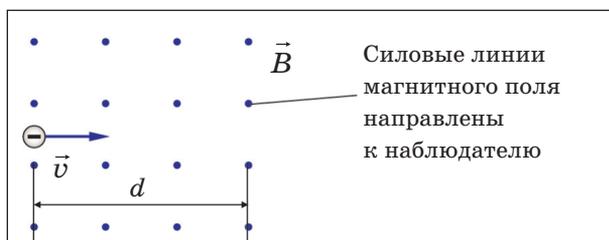


Рис. 184

29.3 ● Альфа-частица (${}^4_2\text{He}$) со скоростью 15 000 км/с влетает в камеру Вильсона, находящуюся в магнитном поле с индукцией 4,3 Тл. Направление скорости частицы перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Чему равен радиус кривизны на начальном участке траектории? Как будет меняться кривизна траектории при дальнейшем движении частицы?

29.4 ● Однородное магнитное поле занимает область пространства шириной d с плоскими границами (рис. 184). Электрон влетает в магнитное поле со скоростью v , направление которой перпендикулярно вектору магнитной индукции поля и плоскости границы. При каком минимальном значении индукции магнитного поля B электрон не сможет преодолеть область магнитного поля?



29.5. Существуют так называемые МГД-генераторы – устройства, позволяющие преобразовывать механическую энергию электропроводящего вещества (жидкости, газа) непосредственно в электрическую энергию. Каковы физические принципы действия МГД-генераторов? Каковы перспективы их практического применения?

§ 30. СИЛА АМПЕРА



Исследования Ампера, в которых он установил законы механического взаимодействия электрических токов, принадлежат к числу самых блестящих работ, которые были проведены когда-либо в науке.

*Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879),
великий английский физик*

Вы уже знаете, что магнитное поле действует на проводник с током.

Вывод формулы силы Ампера. Расположим рядом с магнитом катушку (рис. 185, а). Замкнём цепь (рис. 185, б), и катушка оттолкнётся. Изменим направление тока в цепи, и катушка притянется к магниту. Можно, повернув магнит, расположить рядом с катушкой другой полюс магнита, и вновь мы будем наблюдать взаимодействие проводника с магнитным полем.



30.1. Как объяснить наблюдающееся взаимодействие проводника с магнитным полем?

Объяснить возникновение этого взаимодействия не составляет труда: на электроны, упорядоченно движущиеся по проводнику, в магнитном поле действует сила Лоренца, направление которой перпендикулярно направлению скорости движения электронов. Силовые линии магнитного поля постоянного магнита в зазоре между его полюсами направлены от северного полюса к южному (вертикально).

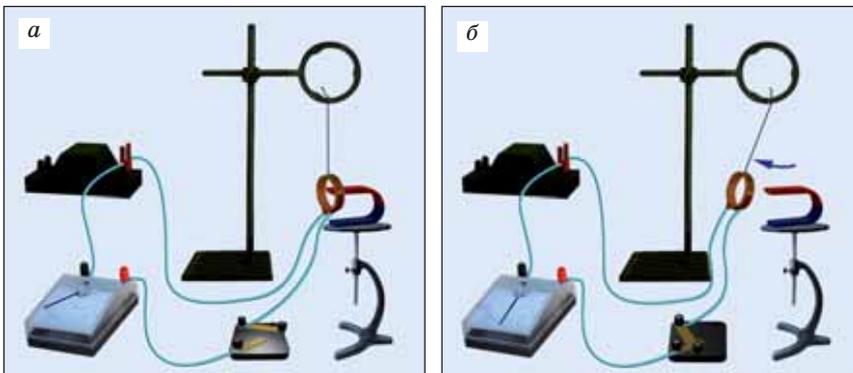


Рис. 185

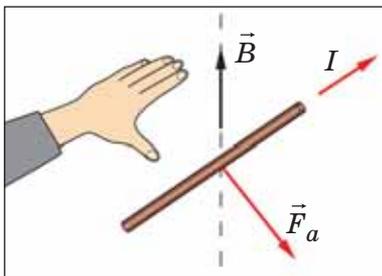


Рис. 186

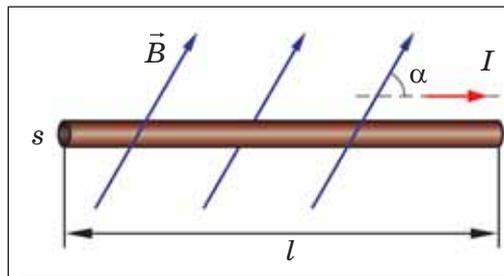


Рис. 187

Примените правило левой руки и убедитесь, что сила Лоренца, действующая на электроны в проводнике, а значит, и равнодействующая сила на весь проводник с током направлена так, что вызывает смещение проводника в горизонтальном направлении. **Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, называется силой Ампера.**

Направление силы Ампера определяют по правилу левой руки (рис. 186). Если ладонь левой руки расположить так, чтобы силовые линии магнитного поля входили в ладонь, а четыре пальца были направлены вдоль проводника по направлению тока, то отогнутый на 90° большой палец покажет направление силы, действующей на проводник с током со стороны магнитного поля.

Выведем теперь формулу, позволяющую рассчитать силу Ампера. Пусть в магнитном поле с индукцией B находится прямой проводник длиной l и направление вектора магнитной индукции \vec{B} составляет угол α с направлением тока I (рис. 187).

Так как сила Ампера – равнодействующая сил Лоренца, действующих на заряженные частицы, движущиеся в проводнике, то

$$F_A = NF_m, \quad (30.1)$$

где N – число движущихся заряженных частиц в проводнике;
 F_m – сила Лоренца.



30.2. Что называют концентрацией частиц?

Число движущихся заряженных частиц N выразим через их концентрацию n и объём проводника:

$$N = nV.$$

В свою очередь объём проводника можно легко определить, если известно его поперечное сечение s :

$$V = sl.$$

Тогда

$$N = nsl. \quad (30.2)$$

Сила Лоренца F_m определяется также известным образом:

$$F_m = q_0 Bv \sin \alpha. \quad (30.3)$$

С учётом соотношений (30.2) и (30.3) выражение (30.1) примет вид

$$F_A = nslq_0 Bv \sin \alpha,$$

или, переставив множители, имеем

$$F_A = q_0 nsvBl \sin \alpha. \quad (30.4)$$

Обратите внимание на первые четыре сомножителя

$$q_0 nsv$$

в формуле (30.4) и сравните произведение этих четырёх сомножителей с формулой (18.5) – эти четыре сомножителя и определяют силу тока в проводнике!

$$I = q_0 nsv.$$

Таким образом,

$$F_A = IBl \sin \alpha,$$

или

$$F_A = BIl \sin \alpha. \quad (30.5)$$



30.3. От чего зависит значение силы Ампера? В каком случае сила Ампера равна нулю?

Лабораторная работа «Изучение силы Ампера и определение магнитной индукции постоянного магнита».

Оборудование: источник тока, реостат, амперметр, постоянный дугообразный магнит, ключ, соединительные провода, штатив с лапкой, П-образная рамка из медной проволоки, весы, измерительная линейка.

Указания к работе:



Задание 1. Изучение силы Ампера.

Закрепите в лапке штатива наконечники двух соединительных проводов и подвесьте к ним П-образную рамку из медной проволоки так, чтобы она свободно могла совершать колебательное движение в вертикальной плоскости. Включите рамку в электрическую цепь, расположите рядом с горизонтальным проводником рамки постоянный дугообразный магнит (рис. 188).

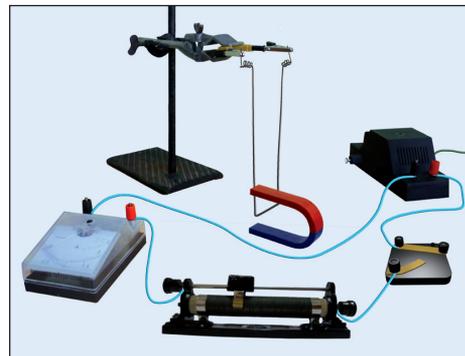


Рис. 188

Проверьте, позволяет ли правило левой руки определить направление силы Ампера.

Выясните, как сила Ампера зависит:

- от силы тока в проводнике,
- от длины проводника, находящегося в магнитном поле (поставьте рядом два постоянных магнита),
- от величины магнитной индукции (если удалить магнит на некоторое расстояние от горизонтального проводника, то проводник будет находиться в поле с меньшей индукцией),
- от угла между направлением вектора магнитной индукции и направлением тока в проводнике.

Сделайте вывод, подтверждается ли качественно формула для расчёта силы Ампера [формула (30.5)].



Задание 2. Определение магнитной индукции постоянного магнита.

Пусть при прохождении по рамке тока силой I рамка под действием силы Ампера отклонилась от вертикали на угол φ (рис. 189).

Укажем силы, действующие на рамку: это сила тяжести $\vec{F}_{тяж}$, приложенная к центру тяжести (точка C), сила Ампера, действующая на горизонтальный проводник \vec{F}_A , и сила реакции \vec{N} , действующая на рамку со стороны оси вращения в точке O . Рамка может поворачиваться вокруг точки O – оси вращения.



30.4. Что называют плечом силы? Чему равны плечи сил \vec{F}_1 , \vec{F}_2 , \vec{F}_3 , приложенных к диску, вращающемуся относительно точки O (рис. 190)?



30.5. Как формулируется условие равновесия рычага?

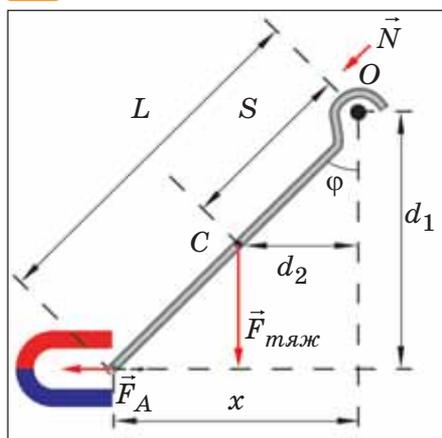


Рис. 189

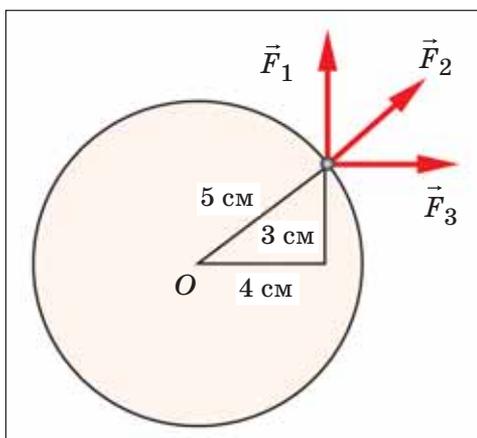


Рис. 190

Плечо силы реакции \vec{N} относительно оси вращения – точки O , очевидно, равно нулю, плечо силы Ампера равно d_1 , а плечо силы тяжести – d_2 (обозначения указаны на рисунке 189).

В соответствии с условием равновесия рычага

$$F_A d_1 = F_{тяж} d_2.$$

Плечи d_1 и d_2 несложно определить:

$$d_1 = L \cos \varphi,$$

где L – длина (высота) рамки,

$$d_2 = S \sin \varphi,$$

где S – расстояние OC – от оси вращения до центра тяжести рамки.

Тогда

$$F_A L \cos \varphi = F_{тяж} S \sin \varphi,$$

$$F_A L = F_{тяж} S \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi},$$

$$F_A L = F_{тяж} S \operatorname{tg} \varphi. \quad (30.6)$$



30.6. По какой формуле рассчитывается сила Ампера?

$$F_A = BIl, \quad (30.7)$$

где длину проводника, находящегося в магнитном поле, можно принять равной толщине магнита l (см. рис. 189).

В формуле (30.7) также учтено, что угол между направлением вектора магнитной индукции и направлением тока в проводнике составляет 90° .



30.7. По какой формуле рассчитывается сила тяжести?

$$F_{тяж} = mg, \quad (30.8)$$

где m – масса рамки.

Из соотношений (30.6) – (30.8) несложно получить следующее выражение для определения магнитной индукции:

$$B = \frac{mgS \operatorname{tg} \varphi}{IlL}. \quad (30.9)$$

Тангенс угла отклонения φ можно вычислить следующим образом:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{d_1},$$

где d_1 , очевидно, равно

$$d_1 = \sqrt{L^2 - x^2}.$$

Тогда выражение (30.8) окончательно примет вид

$$B = \frac{mgS}{lIL} \cdot \frac{x}{d_1}. \quad (30.10)$$

Проведите необходимые измерения величин. Данные занесите в таблицу.

I , А	x , мм	l , мм	L , мм	d_1 , мм	S , мм	m , г	B , Тл

Для измерения расстояния S от оси вращения до центра тяжести – точки C – положите рамку на ребро линейки и, добившись равновесия, определите положение центра тяжести рамки.

Вычислите среднее значение магнитной индукции \bar{B} , воспользовавшись формулой (30.10).

Вычислите относительную погрешность измерения магнитной индукции ε_B по формуле

$$\varepsilon_B = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta d}{d}.$$

Абсолютные погрешности величин принять равными:

Δm – половина значения массы наименьшего разновеса, использованного при измерении массы рамки,

$$\Delta g = 0,05 \text{ м/с}^2,$$

$$\Delta S = 2 \text{ мм},$$

$$\Delta x = 2 \text{ мм},$$

$$\Delta I = 0,05 \text{ А},$$

$$\Delta l = 1 \text{ мм},$$

$$\Delta L = 2 \text{ мм},$$

$$\Delta d = 2 \text{ мм}.$$

Относительная погрешность измерения магнитной индукции ε_B по определению равна

$$\varepsilon_B = \frac{\Delta B}{B},$$

где \bar{B} – среднее значение магнитной индукции, вычисленное по формуле (30.10);

ΔB – абсолютная погрешность магнитной индукции.

Вычислите абсолютную погрешность измерения магнитной индукции ΔB .

Запишите результат измерения в виде

$$B = \bar{B} \pm \Delta B.$$

Практическое применение силы Ампера. Многие примеры практического применения силы Ампера вам уже хорошо известны. Перечислим некоторые из них.

Громкоговоритель (рис. 191) содержит постоянный магнит кольцеобразной формы 1. Внутри магнита находится катушка 2, которая скреплена с диффузором 3.

Если по катушке пропускают переменный ток (частотой 16–20 000 Гц), то под действием переменной силы Ампера катушка колеблется (притягивается или отталкивается от магнита). Вместе с катушкой колеблется и диффузор, вследствие чего возникают колебания воздуха – звук.

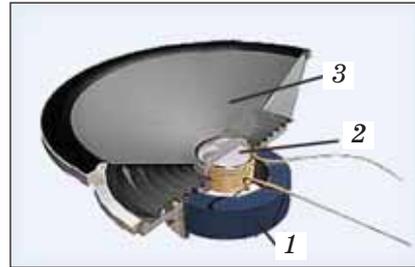


Рис. 191



30.8. Почему частота переменного тока, подаваемого на катушку громкоговорителя, должна быть в диапазоне от 16 до 20 000 Гц?

Электроизмерительные приборы магнитоэлектрической системы (рис. 192). Подвижная рамка 1 находится в магнитном поле между полюсами постоянного магнита 2. Если по рамке проходит ток, то под действием силы Ампера рамка с током поворачивается до тех пор, пока её действие не будет уравновешено действием силы упругости, возникающей при деформации пружин 3, скреплённых с рамкой. О силе тока в рамке судят по углу поворота стрелки 4, прикреплённой к рамке с током.

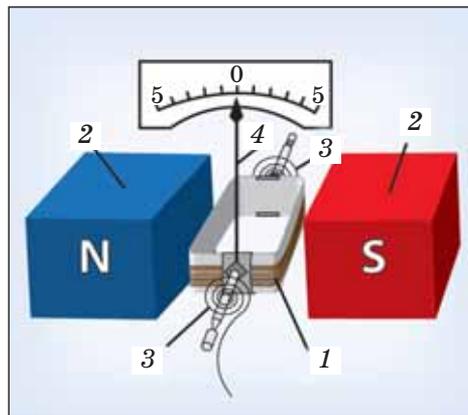


Рис. 192

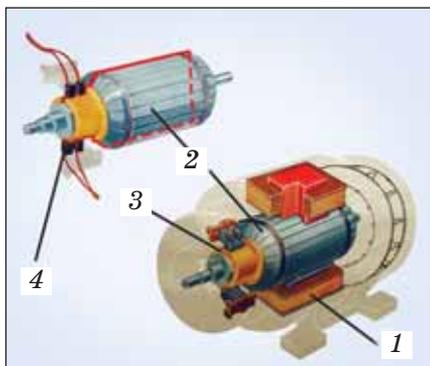


Рис. 193

Электродвигатель постоянного тока (рис. 193) содержит такие основные конструктивные элементы, как статор 1, ротор 2, коллектор 3 и щётки 4. Статор – источник магнитного поля (постоянный магнит или электромагнит). Ротор – стальной сердечник, на котором расположено несколько отдельных обмоток – катушек из медной проволоки. Выводы каждой из катушек припаяны к коллекторным пластинам. Пластины крепятся на изолированном барабане, который закреплён на

оси ротора. По бокам барабана находятся угольные щётки, которые плотно прижаты к коллекторным пластинам.

Через скользящие контакты «щётка – коллекторная пластина» в одну из обмоток статора подаётся ток. Магнитное поле действует на проводник с током, ротор поворачивается. Со щётками контактирует следующая обмотка ротора, вновь происходит поворот ротора и так далее. В итоге ротор электродвигателя вращается в магнитном поле.



Наиболее широкое применение в промышленности нашли так называемые *асинхронные трёхфазные электродвигатели с короткозамкнутым ротором*. Рассмотрим, каков принцип действия таких двигателей (рис. 194, а, б). Статор двигателя содержит три обмотки, которые являются источником магнитного поля (рис. 194, а). В эти обмотки специально подаются такие переменные

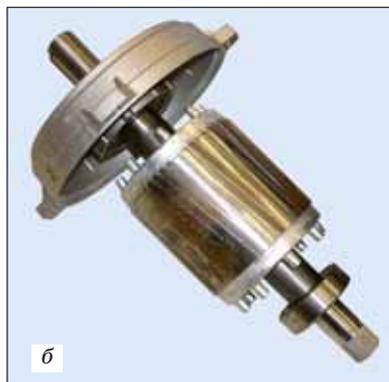
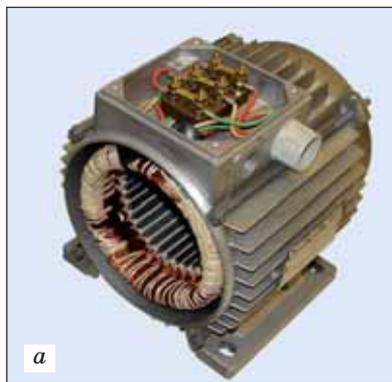


Рис. 194

токи, что внутри статора создаётся магнитное поле, вектор магнитной индукции \vec{B} которого изменяет своё направление, поворачиваясь в плоскости статора. Частота, с которой происходит вращение вектора магнитной индукции, равна частоте переменного тока в обмотках статора.

Ротор электродвигателя представляет собой медные или алюминиевые стержни, соединённые с торцов металлическими кольцами (рис. 194, б). Ротор такого типа называют «беличьим колесом».



30.9. В чём заключается явление электромагнитной индукции?

Переменное магнитное поле, пронизывающее ротор, в соответствии с явлением электромагнитной индукции приводит к возникновению тока в проводниках – стержнях ротора. В результате действия магнитного поля статора на ток, протекающий в роторе, возникают силы Ампера, действующие на проводники – стержни «беличьего колеса», и электродвигатель вращается.

Простота конструкции асинхронного электродвигателя (отсутствие скользящих контактов для создания тока в электродвигателе) обеспечивает надёжность их эксплуатации и позволяет асинхронным электродвигателям быть конкурентоспособными как в сравнении с электродвигателями постоянного тока, так и в сравнении с электродвигателями переменного тока других видов.

Сила Ампера, $F_A = BIl \sin \alpha$, правило левой руки, громкоговоритель, электроизмерительный прибор, электродвигатель постоянного тока, асинхронный трёхфазный электродвигатель переменного тока.

30.1 ● Прямой проводник длиной 15 см, по которому течёт ток силой 5 А, находится в магнитном поле с индукцией 20 мТл. Определите, с какой силой магнитное поле действует на этот участок проводника, если угол между направлением вектора магнитной индукции и направлением тока составляет 30° .

30.2 ● Сила тока в горизонтально расположенном проводнике длиной 10 см и массой 2,5 г равна 8 А. Определите минимальное значение модуля вектора магнитной индукции магнитного поля, в которое необходимо поместить проводник, чтобы сила тяжести уравновесилась силой Ампера. Как должен быть при этом направлен вектор магнитной индукции?

30.3 ● Используя правило для определения направления вектора магнитной индукции магнитного поля прямого проводника с током и правило левой руки, докажите, что два прямых, параллельно расположенных проводника, по которым текут токи одного направления, притягиваются друг к другу.

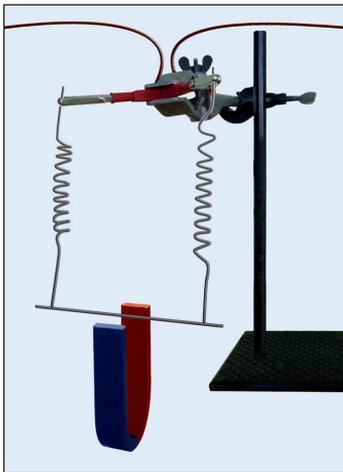


Рис. 195

между полюсами дугообразного магнита равен 30 мТл, длина проводника, находящегося в магнитном поле, 4 см.

30.5 ● По двум параллельным горизонтально расположенным рельсам малого сопротивления может без трения скользить проводник длиной l , массой m и сопротивлением R (рис. 196). Определите, с каким ускорением придёт в движение проводник, если к концам рельс подсоединить конденсатор ёмкостью C , первоначально имевший заряд q . Индукция магнитного поля B .

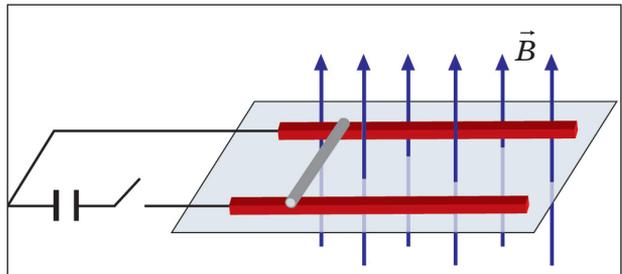


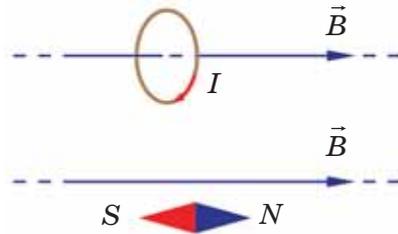
Рис. 196

30.4 ● Медный проводник подвешен в горизонтальной плоскости с помощью двух вертикально расположенных пружин жёсткостью 1,5 Н/м каждая (рис. 195). Проводник находится в магнитном поле между полюсами дугообразного магнита. На сколько сместится проводник вниз, если по нему пропустить ток 5 А? Вектор магнитной индукции магнитного поля

Самое важное в разделе «Основы магнетизма»

1. Вокруг движущихся заряженных частиц существует особая форма материи – магнитное поле.

Магнитное поле характеризуют вектором магнитной индукции \vec{B} (тесла, Тл).



2. Вещества имеют различные магнитные свойства, обусловленные движением электронов в атомах вещества. Сильномагнитные вещества – ферромагнетики.

3. Магнитное поле действует на движущиеся заряженные частицы.

$$F_m = q_0 B v \sin \alpha .$$

Это явление находит широкое применение (масс-спектрографы, ускорители заряженных частиц, токамаки).

4. Магнитное поле действует на проводник с током.

$$F_A = B I l \sin \alpha .$$

Это явление используется на практике (громкоговорители, электроизмерительные приборы, электродвигатели).

III. 1 ● Дугообразный магнит поднесли к экрану осциллографа, и светящаяся точка – след электронного луча – сместилась на экране прибора по горизонтали вправо (рис. 197). Каким – южным или северным – полюсом является нижняя часть дугообразного магнита, поднесённого к экрану осциллографа? Ответ обосновать.

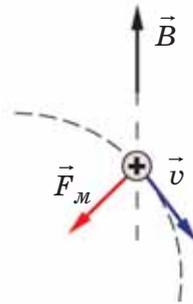


Рис. 197

III. 2 ● Электромагнит удерживает груз. На что в этом случае расходуется электро-энергия, подводимая к электромагниту, ведь груз не перемещается и, следовательно, механическая работа не совершается?

III. 3 ● В одном из своих писем Эрнесту Резерфорду Пётр Леонидович Капица описывал результаты опытов по созданию сверхмощного магнитного поля, возникающего в катушке, по которой пропускали очень большой ток.

«Кембридж, 17 декабря 1925 г.

Я пишу вам это письмо в Каир, чтобы рассказать, что мы уже сумели получить поля, превышающие 270 000 ... Мы не смогли пойти дальше, так как разорвалась катушка... Катушка же не была усилена внешним ободом, каковой мы теперь намереемся сделать... теперь мы точно знаем, что происходит, когда разрывается катушка. Мы знаем также теперь, как выглядит дуга в 13 000 ампер... Со страшным нетерпением жажду увидеть вас снова в лаборатории, чтобы... рассказать вам об этой схватке с машинами». Почему разрывалась катушка при пропускании по ней тока?

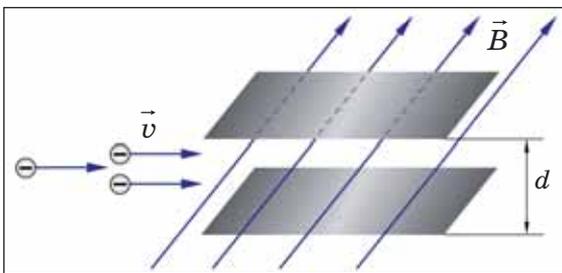


Рис. 198

III. 4 ● Электрон влетает со скоростью v в пространство между пластинами плоского первоначально незаряженного конденсатора, находящимися на расстоянии d друг от друга. Начальная скорость электронов параллельна плоскости пластин конденсатора (рис. 198). Какая разность потенциалов установится между пластинами конденсатора, если внутри конденсатора создать магнитное поле, вектор магнитной индукции которого \vec{B} был бы параллелен плоскости пластин и перпендикулярен начальной скорости электрона?



III. 5. Представьте, что немагнитный железный стержень поместили внутрь катушки электромагнита в качестве сердечника. Замкнув электрическую цепь постоянного тока, в которую включена обмотка электромагнита, силу тока в цепи повышают до некоторого значения, а затем также плавно уменьшают до нуля. Изменив направление тока на противоположное, силу тока в цепи вновь повышают до номинального значения, а затем уменьшают до нуля. Начертите (эскизно) график зависимости индукции магнитного поля электромагнита от силы тока в цепи. (Подсказка. В случае возникновения затруднений при выполнении задания выясните, используя дополнительную литературу, каково содержание понятия «магнитный гистерезис».)

P. S.



При изучении раздела «Основы магнетизма» вы углубили свои знания по ряду вопросов, связанных с магнитным полем.

Теперь вам известно, какой физической величиной характеризуется магнитное поле, как рассчитывается сила, с которой магнитное поле действует на движущуюся заряженную частицу или проводник с током.

Но значительное число вопросов ещё не рассматривалось.

– Вы знаете, что магнитные свойства «источника магнитного поля» – катушки с током – характеризуются физической величиной, именуемой индуктивностью. Но определение индуктивности, единица измерения этой величины и формулы, связывающие данную величину с другими, не изучались.

– Вы знаете, что магнитное поле обладает энергией, но формула, позволяющая рассчитать энергию магнитного поля, не приводилась.

– Вам известно явление электромагнитной индукции и частный случай этого фундаментального явления – явление самоиндукции. Но знания по вопросам, связанным с явлениями индукции, самоиндукции, не углублялись.

Приложение. **Основные понятия механики**

1. Механическое движение. Виды движения

Механическое движение

Равномерное движение. Скорость равномерного движения

Неравномерное движение. Ускорение и перемещение тела при равноускоренном движении

Криволинейное движение. Центроостремительное ускорение.

Период и частота вращения

2. Законы Ньютона

Первый закон Ньютона

Второй закон Ньютона

Третий закон Ньютона

Алгоритм решения задач по механике

3. Силы в механике

Сила всемирного тяготения. Сила тяжести

Сила упругости. Вес тела. Невесомость

Сила трения

4. Законы сохранения в механике

Импульс. Закон сохранения импульса. Реактивное движение

Механическая энергия. Работа. Мощность

Закон сохранения механической энергии

1. МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ. ВИДЫ ДВИЖЕНИЯ

Механическое движение. Механика – раздел физики, изучающий механическое движение.

Механическое движение – это изменение положения тела в пространстве относительно других тел с течением времени.

Приступая к рассмотрению механического движения, во-первых, необходимо выбрать *тело отсчёта* – то есть тот предмет, относительно которого указывается положение движущегося тела; во-вторых, необходимо выбрать *систему координат* – это позволит указать направление движения и положение движущегося тела; в-третьих, необходим *прибор для измерения времени* – ведь без такого прибора (часов) нельзя будет определить, в какой момент времени движущееся тело находится в той или иной точке пространства.

Тело отсчёта, система координат и прибор для отсчёта времени образуют систему отсчёта.

В разных системах отсчёта механическое движение одного и того же тела различно. Как вы знаете, это свойство движения называется **относительностью механического движения**.

Напомним, что линия, по которой движется тело, называется *траекторией*, а длина траектории – *путь*, пройденный движущимся телом (рис. 199).

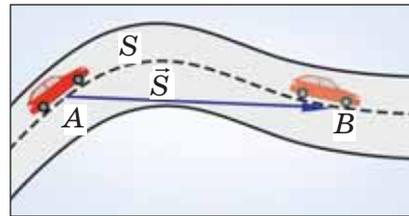


Рис. 199

Вектор, соединяющий начальное положение тела с его последующим положением, называют перемещением тела \vec{S} .

Такие понятия, как путь S , пройденный телом, и перемещение \vec{S} , безусловно, различаются. Ведь путь S – это скалярная величина, а перемещение \vec{S} – величина векторная. Путь характеризуется только численным значением, а перемещение – и численным значением, и направлением.

Простейший случай механического движения – *прямолинейное движение*, когда траекторией движущегося тела является прямая линия. Например, шайба, скользящая по горизонтальному льду, или камень, падающий вертикально вниз, движутся прямолинейно (рис. 200, 201).

В случае прямолинейного движения перемещение тела направлено вдоль траектории движения.

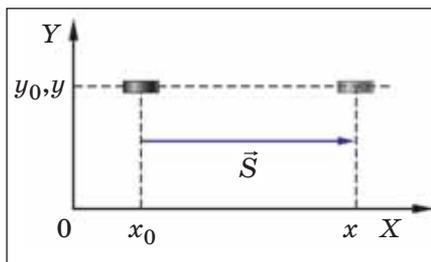


Рис. 200

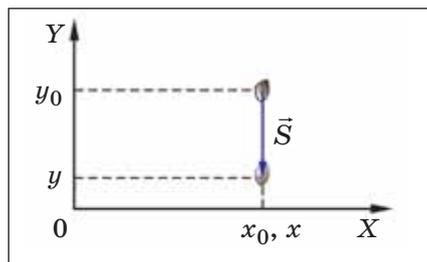


Рис. 201

Отрезок от проекции начала вектора до проекции конца вектора называют проекцией вектора на данную ось. Причём если координата проекции конца вектора больше координаты начала вектора, то проекция вектора считается положительной. Если же координата проекции конца вектора меньше координаты начала вектора, то проекция вектора считается отрицательной.

Рассмотрим рисунок 200. Проекция S_x вектора \vec{S} на ось X равна

$$S_x = x - x_0. \quad (\text{П.1.1})$$

Проекция S_y (читается: эс игрек) вектора \vec{S} на ось Y в рассматриваемом случае равна

$$\begin{aligned} S_y &= y - y_0, \\ S_y &= 0. \end{aligned}$$

Из рисунка 201 видно, что проекция вектора \vec{S} на ось X равна нулю, а проекция вектора \vec{S} на ось Y отрицательна.

Проекция вектора – скалярная величина. Как правило, решая физические задачи и проводя вычисления, определяют скалярные величины – проекции векторов. Зная же проекции вектора, при необходимости легко определить и величину (модуль) вектора, и направление вектора.

Равномерное движение. Скорость равномерного движения. Скорость – физическая величина, характеризующая быстроту механического движения. Наиболее просто определить скорость для случая равномерного движения. Равномерным называют такое движение, при котором тело за любые равные промежутки времени совершает одинаковые перемещения (рис. 202).

Скорость равномерного движения – это величина, равная перемещению тела за единицу времени.

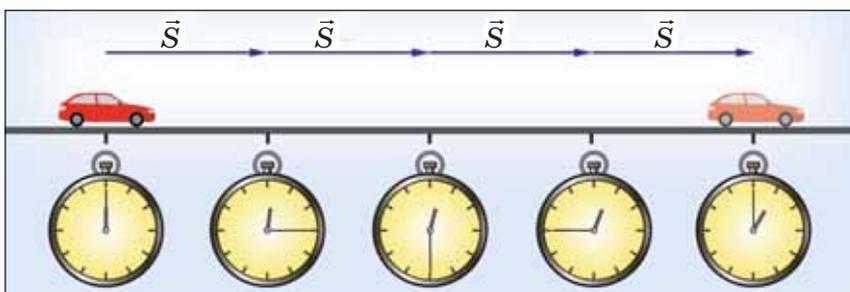


Рис. 202

$$\vec{v} = \frac{\vec{S}}{t}. \quad (\text{П.1.2})$$

Проекции v_x и v_y вектора скорости на оси X и Y при этом вычисляются по формулам:

$$v_x = \frac{S_x}{t}, \quad (\text{П.1.3})$$

$$v_y = \frac{S_y}{t}. \quad (\text{П.1.4})$$

Совместим направление оси X с направлением перемещения (рис. 203). При таком выборе направления осей координат тело перемещается только вдоль *одной* координатной оси. В формулах (П.1.1), (П.1.3) можно не указывать, что определяются проекции именно на ось X . Тогда записи выражений, содержащих проекции векторов, упростятся. Так, выражения (П.1.1), (П.1.3) запишутся в виде

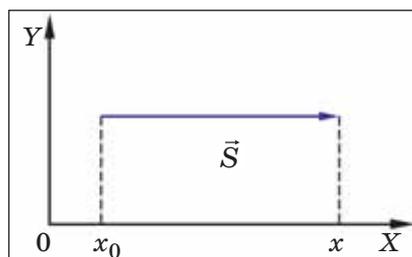


Рис. 203

$$S_x = x - x_0, \quad (\text{П.1.5})$$

$$v = \frac{S}{t}, \quad (\text{П.1.6})$$

$$v = \frac{x - x_0}{t}. \quad (\text{П.1.7})$$

Последняя формула позволяет определить проекцию скорости v равномерного движения.

Координата x равномерно движущегося тела определяется по формуле

$$x = x_0 + vt. \quad (\text{П.1.8})$$

Очевидно, что графиком зависимости координаты тела x от времени t при равномерном движении будет являться прямая линия.

Неравномерное движение. Ускорение и перемещение тела при равноускоренном движении. Равномерное движение встречается крайне редко. В большинстве случаев тела движутся неравномерно, увеличивая или уменьшая скорость. Так, при движении автомобиля то разгоняется, то притормаживает – скорость меняется. С переменной скоростью движется бегун на дистанции, поезд в метро и так далее.

Быстрота неравномерного движения определяется *мгновенной скоростью* тела. Мгновенная скорость – это скорость, которую тело имеет в определённый момент времени в соответствующей этому моменту точке траектории. Мгновенную скорость вычисляют по формуле

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{S}}{\Delta t},$$

где $\Delta \vec{S}$ – перемещение тела за малый интервал времени Δt . Результат вычисления будет тем точнее, чем меньше интервал времени Δt .

Наиболее простым случаем неравномерного движения является равноускоренное движение. **Равноускоренным называют такое движение, при котором скорость тела за любые равные промежутки времени изменяется на одну и ту же величину.**

Чем отличается одно равноускоренное движение от другого? В первую очередь – быстротой изменения скорости. Так, например, при одном равноускоренном движении скорость может каждую секунду увеличиваться на 2 м/с, при другом – на 5 м/с, а при третьем – уменьшаться на 10 м/с. Быстрота изменения скорости равноускоренного движения характеризуется векторной физической величиной – ускорением равноускоренного движения.

Ускорение равноускоренного движения – величина, равная изменению скорости равноускоренного движения за единицу времени.

Если в начальный момент времени t скорость составляет \vec{v}_0 , то ускорение тела \vec{a} равно

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}. \quad (\text{П.1.9})$$

Единица измерения ускорения – 1 м/с².

Определим, как изменяются с течением времени скорость и проекция скорости при равноускоренном движении.

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t,$$

$$v = v_0 + at. \quad (\text{П.1.10})$$

При равноускоренном движении проекция скорости тела прямо пропорциональна времени его движения. Если проекция ускорения положительна, то проекция скорости с течением времени увеличивается. Если же проекция ускорения отрицательна, то в этом случае проекция скорости с течением времени уменьшается. (Часто такое движение называют равнозамедленным.)

График зависимости проекции скорости тела v от времени движения t для случая равноускоренного движения называют *графиком скорости* (рис. 204).

Пусть в некоторый момент времени t_1 проекция мгновенной скорости тела v_1 . Тогда проекция перемещения ΔS_1 за малый интервал времени Δt равна

$$\Delta S_1 = v_1 \Delta t.$$

Из рисунка 204 видно, что проекция перемещения ΔS_1 численно равна площади прямоугольника со сторонами v_1 и Δt .

В другой момент времени t_2 проекция перемещения тела ΔS_2 за малый интервал времени будет равна

$$\Delta S_2 = v_2 \Delta t,$$

где v_2 – мгновенная скорость тела в момент времени t_2 .

Из рисунка 204 вновь видно, что проекция перемещения ΔS_2 численно равна площади прямоугольника со сторонами v_2 и Δt .

Что необходимо сделать, чтобы определить проекцию перемещения S за все время движения тела t ? Очевидно, что нужно сложить все перемещения ΔS_1 , ΔS_2 и так далее за все малые интервалы времени Δt :

$$S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \dots$$

Но каждое перемещение – ΔS_1 , ΔS_2 и так далее – численно равно площади соответствующего прямоугольника под графиком скорости. Следовательно, проекция перемещения S за все время движения t будет равна площади всех прямоугольников под графиком скорости. Площадь же *всех малых* прямоугольников есть площадь трапеции под графиком скорости.

$$S = \frac{v_0 + v}{2} \cdot t.$$

(П.1.11)

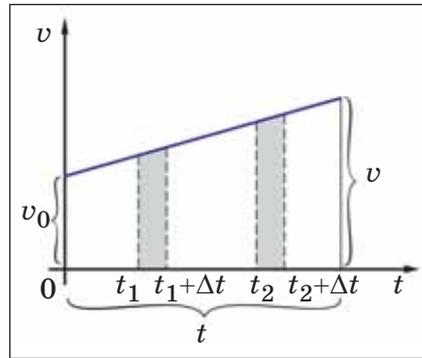


Рис. 204

Воспользуемся формулой (П.1.10). Тогда после несложных преобразований имеем

$$S = v_0 t + \frac{at^2}{2} \quad (\text{П.1.12})$$

Криволинейное движение. Центростремительное ускорение.

Период и частота вращения. При криволинейном движении, когда траектория движущегося тела не является прямой, направление вектора скорости изменяется. Так, к примеру, движется автомобиль на повороте, ребёнок на карусели, Земля вокруг Солнца или искусственный спутник вокруг Земли.

Каково направление мгновенной скорости в каждой точке траектории при криволинейном движении? *При криволинейном движении мгновенная скорость тела направлена по касательной к его траектории.*

Наиболее важным случаем криволинейного движения является случай движения по окружности. Действительно, любое криволинейное движение можно представить как сочетание движений по окружностям различного радиуса (рис. 205). Поэтому, если изучить движение по окружности, то полученные результаты можно будет применить и при рассмотрении любого криволинейного движения.

Наиболее простым случаем движения по окружности является движение с *постоянной по модулю скоростью*. Примерами такого движения являются движение стрелок часов, лопастей вентилятора и так далее.

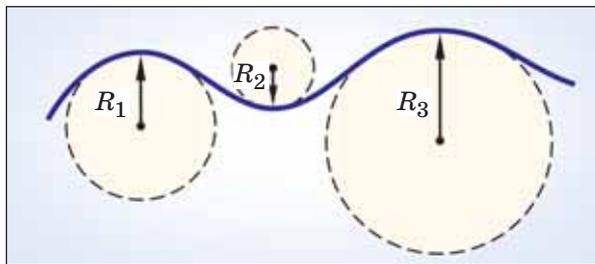


Рис. 205

Движение тела по окружности с постоянной по модулю скоростью – это движение с *переменной скоростью*.

Скорость – величина векторная и при движении тела по окружности *направление вектора скорости изменяется* (рис. 206). Следовательно, перемещаясь по дуге окружности, тело совершает ускоренное движение.

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

Теоретически можно доказать, что вектор ускорения \vec{a} в каждой точке окружности перпендикулярен вектору мгновенной скорости \vec{v} и направлен к центру окружности (рис. 207). По этой причине ускорение называют *центростремительным*.

При движении по дуге окружности с постоянной по модулю скоростью тело движется с центростремительным ускорением.

Модуль центростремительного ускорения равен

$$a_u = \frac{v^2}{r}. \quad (\text{П.1.13})$$

Ещё две физические величины, которые характеризуют вращательное движение, – это *период вращения* и *частота вращения*. Время, за которое вращающееся тело совершает один полный оборот, называют периодом вращения. Период вращения обозначают T и измеряют в секундах (с). Частота вращения – это число оборотов, совершаемых вращающимся телом за единицу времени. Частоту вращения обозначают ν . Единица измерения частоты – $1/\text{с}$ (с^{-1}).

Если тело, вращаясь, делает N оборотов за время t , то период вращения T и частота вращения ν будут соответственно равны

$$T = \frac{t}{N}, \quad (\text{П.1.14})$$

$$\nu = \frac{N}{t}. \quad (\text{П.1.15})$$

Также легко установить связь между периодом T и частотой ν :

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (\text{П.1.16})$$

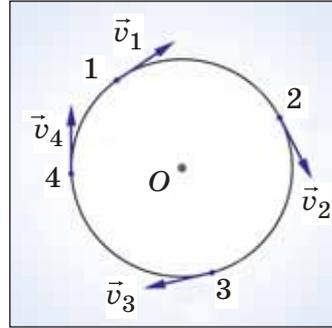


Рис. 206

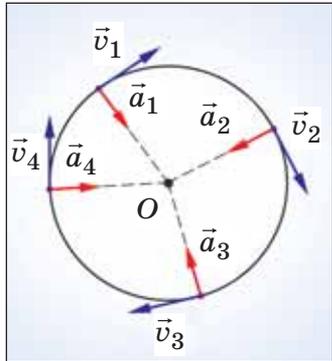


Рис. 207

2. ЗАКОНЫ НЬЮТОНА

Основой механики являются законы движения, сформулированные великим английским ученым И. Ньютоном (1643–1727). В 1687 году был опубликован его главный научный труд – «Математические начала натуральной философии». (На современный язык название этой книги может быть переведено как «Математические основания физики».) Книга Ньютона является выдающимся произведением научной мысли. Именно она превратила физику в ту область человеческих знаний, которая стала играть главенствующую роль в развитии науки, техники, промышленности. Историки науки утверждают, что если бы «Математические начала...» не были бы написаны, то иным был бы ход развития человечества.

И. Ньютон создал завершённую теорию механического движения, которая в настоящее время носит названия классической механики. Ядром механики являются сформулированные Ньютоном три закона.

Первый закон Ньютона. Первый закон, включённый Ньютоном в систему законов механики, часто называют законом инерции. Как будет двигаться *свободное тело*, то есть такое тело, на которое не действуют никакие другие тела? Ответ на этот вопрос и составляет содержание I закона Ньютона:

Всякое тело продолжает удерживаться в своём состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние.

Справедливость любого физического закона должна быть обязательно подтверждена экспериментально. Но как поставить опыт по проверке данного утверждения? Ведь свободных тел в природе нет. На любое тело действуют, например, силой тяготения далекие звезды. Всякое тело, которое мы считаем свободным, является таковым лишь приближённо, с некоторой точностью.

В такой ситуации воспользуемся известным приёмом доказательства «от противного». Во всех известных нам случаях *неравномерного движения* легко обнаружить, что *неравномерно движущееся тело несвободно*. Например, при торможении шайбы по льду или автомобиля на дороге, при падении камня на Землю, при вращении Луны вокруг Земли, при ускоренном движении груза, прикреплённого к пружине, всегда выясняется, что движущееся неравномерно тело несвободно. Следовательно, если бы тело было свободным, то оно бы двигалось равномерно и прямолинейно либо находилось бы в покое.

Любое механическое движение рассматривается относительно определённой системы отсчёта.

По отношению к I закону Ньютона все системы отсчёта можно разделить на два класса:

1. *Инерциальные системы отсчёта.* В инерциальных системах отсчёта выполняется I закон Ньютона.

2. *Неинерциальные системы отсчёта.* В неинерциальных системах отсчёта не выполняется I закон Ньютона.

В этой связи содержание I закона Ньютона может быть изложено следующим образом: **существуют такие системы отсчёта, их называют инерциальными, относительно которых свободное тело либо покоится, либо движется прямолинейно и равномерно.**

При изучении механического движения, как правило, используются инерциальные системы отсчёта. В связи с этим возникает вопрос, равноценны ли инерциальные системы между собой. Иными словами, одинаковым ли законам подчиняется механическое движение в различных инерциальных системах отсчёта. Ответ был дан Галилеем, который выдвинул принцип¹ относительности. Используя понятие инерциальной системы отсчёта, принцип относительности можно сформулировать следующим образом: **законы механики одинаковы во всех инерциальных системах отсчёта**².

Второй закон Ньютона. I закон Ньютона определяет движение *свободного тела*. Закон утверждает, что в инерциальных системах отсчёта свободное тело либо покоится, либо движется прямолинейно и равномерно. Каков же будет характер движения *несвободного тела*? Опыт убеждает нас, что если тело несвободно, то есть взаимодействует с другими телами, то движение тела изменяется. Величину действия одного тела на другое мы характеризуем *силой*. Как писал Ньютон, «приложенная сила есть действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения». Измеряется сила в ньютонах, обычно с помощью прибора динамометра.

Ньютон, формулируя II закон, использовал понятие «количество движения», понимая под этим произведение массы тела на его ско-

¹ Принцип – основное исходное положение какой-либо теории, науки. Физические принципы подтверждают опытными фактами.

² Ньютон сформулировал принцип относительности в качестве одного из следствий к законам движения следующим образом: относительные движения друг по отношению к другу тел, заключённых в каком-либо пространстве, одинаковы, покоится ли это пространство или движется равномерно и прямолинейно без вращения.

рость. Мы же сформулируем II закон, как это принято в настоящее время, используя понятие «ускорение тела».

Наблюдения, наш повседневный опыт свидетельствуют, что **ускорение тела тем больше, чем больше сила, действующая на него.** Действительно, мяч получает тем большее ускорение (в результате приобретает большую скорость), чем сильнее ударить по мячу. Стрела при выстреле из лука получает тем большее ускорение (в результате приобретает тем большую скорость), чем сильнее изогнут лук, чем больше сила упругости.

Одновременно ускорение, приобретаемое телом под действием силы, тем меньше, чем больше масса тела. Представьте, какое ускорение будет иметь при ударе футболиста не мяч, а пушечное ядро, не стрела при вылете из лука, а копье.

Обобщение таких наблюдений позволяет сформулировать II закон Ньютона.

Ускорение, приобретаемое телом при действии на него силы, прямо пропорционально силе, действующей на тело, и обратно пропорционально массе тела.

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (\text{II.2.1})$$

Формула II закона Ньютона позволяет установить связь единицы измерения силы – ньютон – с основными единицами СИ – килограмм, метр и секунда.

$$1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м} / \text{с}^2.$$

Второй закон Ньютона позволяет рассчитать ускорение тела. Если же известно ускорение тела \vec{a} , то можно определить мгновенную скорость тела \vec{v} , а также координату тела x в любой момент времени. Например, в случае равноускоренного движения

$$v = v_0 + at,$$

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

Благодаря II закону Ньютона можно рассчитать движение любых тел. Движение капли дождя и движение груза, совершающего колебания под действием пружины. Движение лыжника, скатывающегося по склону горы, и движение космического корабля. Движение Луны вокруг Земли и движение гигантских галактик, взаимодействующих между собой.

Совпадение результатов расчётов, проводимых на основе II закона Ньютона, с наблюдаемым на практике механическим движением является наилучшим и самым убедительным доказательством правильности законов Ньютона¹.

Как следует из II закона Ньютона, для определения ускорения необходимо знать силу, действующую на тело. Но, как правило, на тело действует не одна, а несколько сил. В этом случае, чтобы применить II закон Ньютона, нужно вычислить равнодействующую силу.

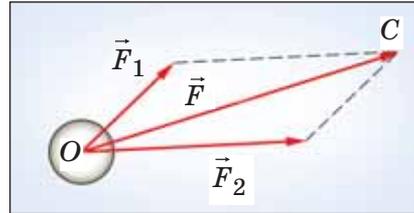


Рис. 208

Сила – векторная величина, и сложение векторов производят по определённым правилам, например по правилу параллелограмма (рис. 208).

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2.$$

Третий закон Ньютона. III закон был сформулирован Ньютоном следующим образом:

Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе – взаимодействия двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные стороны.

Иными словами, тела взаимодействуют с силами, равными по величине и противоположными по направлению (рис. 209).

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2. \quad (\text{П.2.2})$$

Алгоритм решения задач по механике. При решении задач по механике рекомендуется придерживаться следующего алгоритма:

1. Выполните чертёж, укажите все силы, действующие на тело, движение которого рассматривается.

2. Запишите формулу II закона Ньютона в виде

$$m\vec{a} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots$$



Рис. 209

¹ В XX веке учёные-физики обнаружили, что расчёт движения микрочастиц, например, электронов в атоме и расчёт движения тел, имеющих скорость, близкую к скорости света, требует применения законов движения, отличных от законов Ньютона.

3. Выберите систему отсчёта, укажите направление осей координат.

4. Определите проекции каждой силы $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \dots$ на выбранные оси координат.

5. Запишите формулу II закона Ньютона в проекции на каждую из осей координат:

$$\begin{cases} ma_x = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} + \dots, \\ ma_y = F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} + \dots \end{cases} \quad (\text{П.2.3})$$

6. При необходимости дополните систему уравнений (П.2.3) кинематическими соотношениями. Например,

– для равноускоренного движения:

$$\begin{aligned} v_x &= v_{0x} + a_x t, \\ S_x &= v_{0x} t + \frac{a_{0x} t^2}{2}, \\ x &= x_0 + S_x. \end{aligned}$$

– для движения по окружности с постоянной по величине скоростью:

$$\begin{aligned} a_y &= \frac{v^2}{R}, \\ v &= \frac{2\pi R}{T}. \end{aligned}$$

7. Решите систему уравнений и получите ответ. Проанализируйте полученный ответ.

3. СИЛЫ В МЕХАНИКЕ

Закон всемирного тяготения. Сила тяжести. Если бросить мяч, то через некоторое время он изменит направление и величину скорости и упадёт на землю. Это результат действия на мяч силы со стороны Земли. Луна вращается вокруг Земли практически по круговой орбите, то есть движется с центростремительным ускорением. Следовательно, со стороны Земли на Луну действует сила – сила всемирного тяготения. Точно так же Земля и другие планеты вращаются вокруг Солнца под действием силы всемирного тяготения.

Действительно, если на планеты не действовала бы сила тяготения, то эти тела были бы *свободными*. Тогда в соответствии с I законом Ньютона – законом инерции – планеты двигались бы прямоли-

нейно и равномерно. Но планеты вращаются вокруг Солнца; это возможно только в том случае, когда на них со стороны Солнца действует сила. В соответствии с III законом Ньютона тела *взаимодействуют*. Это значит, что не только Солнце притягивает планету, но планета с такой же по величине силой притягивает Солнце. Не только Земля притягивает Луну, но и Луна – Землю.

Ньютон предположил, что *все тела* во Вселенной притягиваются друг к другу с силами всемирного тяготения. (Эти силы еще называют гравитационными силами – от латинского слова *gravitas* – тяжесть.) Им был установлен **закон всемирного тяготения**.

Два тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

Математически закон всемирного тяготения выражается формулой

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (\text{П.3.1})$$

где m_1 и m_2 – массы взаимодействующих тел;
 r – расстояние между телами.

Коэффициент G называют постоянной всемирного тяготения (гравитационной постоянной), и он равен

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}.$$

В каком случае расчёт гравитационных сил непосредственно по формуле всемирного тяготения приводит к точному результату? Взаимодействующие тела должны находиться на таком расстоянии, чтобы их собственные размеры были малы в сравнении с расстоянием между телами. Тогда считают, что массы взаимодействующих тел m_1 и m_2 сосредоточены в двух отдельных точках. И в этом случае расстояние r – расстояние между точками (телами). Подобным же образом проводят расчёт и в случае взаимодействия двух тел шарообразной формы либо при взаимодействии «шар – тело малых размеров».

В повседневной жизни мы не обнаруживаем сил тяготения между телами, имеющими незначительные массы. Но если хотя бы одно из тел имеет значительную массу (планеты, звёзды), то тогда ситуация иная. Например, сила тяготения Луны к Земле так велика, что этой силы хватило бы для разрыва стального троса диаметром 700 км!

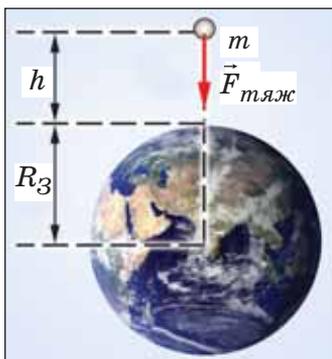


Рис. 210

Силу всемирного тяготения, действующую на тело со стороны Земли (или других планет), называют силой тяжести. Как рассчитать силу тяжести? Пусть тело массой m находится на расстоянии h от поверхности Земли (рис. 210). Тогда сила тяжести $F_{тяж}$ равна

$$F_{тяж} = \frac{G M_З m}{(R_З + h)^2}, \quad (\text{П.3.2})$$

где $M_З$ – масса Земли;

$R_З$ – радиус Земли.

Средний радиус Земли составляет около 6400 км. Поэтому при подъеме тела на несколько десятков, сотен и даже тысяч метров сила тяжести неизменна. Только при значительной высоте подъема сила тяжести уменьшается.

В соответствии со II законом Ньютона под действием силы тяжести тело будет двигаться с ускорением. **Ускорение, сообщаемое телу силой тяжести, называют ускорением свободного падения** и обозначают буквой g .

Рассчитаем ускорение свободного падения g вблизи поверхности Земли.

$$g = \frac{F_{тяж}}{m}.$$

Чему будет равна сила тяжести вблизи поверхности Земли?

$$F_{тяж} = \frac{G M_З m}{R_З^2}.$$

Следовательно,

$$g = \frac{G M_З}{R_З^2}. \quad (\text{П.3.3})$$

Из формулы (П.3.3) следует, что ускорение свободного падения тела не зависит от массы тела! Все тела падают на Землю с одним и тем же ускорением.

Среднее значение ускорения свободного падения равно

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2.$$

Определив опытным путём ускорение свободного падения (измеряя время свободного падения тела с некоторой высоты или используя маятник, совершающий малые колебания) и применив закон всемирного тяготения, можно «взвесить» Землю. Действительно, в соответствии с формулой (П.3.3)

Тогда
$$g = \frac{GM_3}{R_3^2}.$$

Проведем расчёт:
$$M_3 = \frac{gR_3^2}{G}.$$

$$M_3 = \frac{9,8 \cdot (6400 \cdot 10^3)^2}{6,67 \cdot 10^{-11}} = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг.}$$

Вообразите, что на Земле имеется очень высокая гора и на вершине этой горы за пределами атмосферы установлено орудие (рис. 211). При выстреле из орудия снаряд улетит тем дальше, чем больше его скорость.

Можно сообщить снаряду такую скорость, на столько же «закрученная» поверхность Земли «удалится» от снаряда на столько, на столько он приблизится к Земле под действием силы тяжести. В итоге снаряд совершит виток вокруг Земли, станет *искусственным спутником*.

Скорость, которой должно обладать тело, чтобы стать искусственным спутником Земли (ИСЗ), называют *первой космической скоростью*. Рассчитаем эту скорость. Пренебрежём силой сопротивления воздуха и будем считать, что на спутник действует только сила тяжести (рис. 212):

$$\vec{F}_{\text{тяж}} = m\vec{g}.$$

Запишем II закон Ньютона:

$$m\vec{a} = \vec{F}_{\text{тяж}}.$$

Выберем ось координат OX , направив её к центру Земли. Тогда проекция силы тяжести положительна:

$$(F_{\text{тяж}})_x = mg$$

и

$$ma_x = (F_{\text{тяж}})_x,$$

$$a_x = g.$$

(П.3.4)

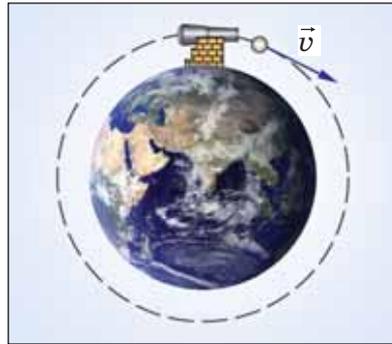


Рис. 211

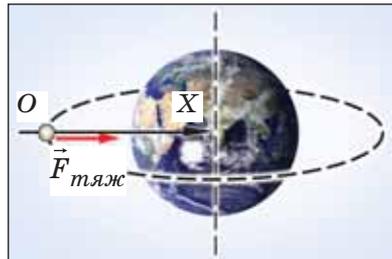


Рис. 212

Если тело движется по окружности с постоянной по величине скоростью, то, как вы знаете, оно движется с центростремительным ускорением a_u .

Следовательно,

$$a_x = a_u.$$

С учётом (П.3.4) имеем

$$\begin{aligned} a_u &= g, \\ a_u &= \frac{v^2}{R_3}. \end{aligned} \quad (\text{П.3.5})$$

Тогда соотношение (П.3.5) примет вид

$$\frac{v^2}{R_3} = g.$$

Отсюда

$$v = \sqrt{gR_3}, \quad (\text{П.3.6})$$

$$v = 7,9 \text{ км/с.}$$

Итак, если сообщить телу скорость в горизонтальном направлении около 8 км/с, то оно станет искусственным спутником Земли. При такой скорости спутник будет двигаться на небольшой (в сравнении с радиусом планеты) высоте по круговой орбите.

Сила упругости. Вес тела. Невесомость.

При деформации тела изменяется расстояние между частицами тела (рис. 213). Это приводит к изменению сил электрического взаимодействия между частицами тела. Так, при сближении одноимённо заряженных частиц возрастают силы электрического отталкивания. При сближении разноимённо заряженных частиц увеличиваются силы притяжения между ними. В итоге возникает *сила упругости*.

Сила упругости тем больше, чем больше величина деформации. Пусть, к примеру, пружину растянули так, что её длина увеличилась на x (рис. 214). Обозначим возникшую при этом силу упругости как $F_{упр}$.

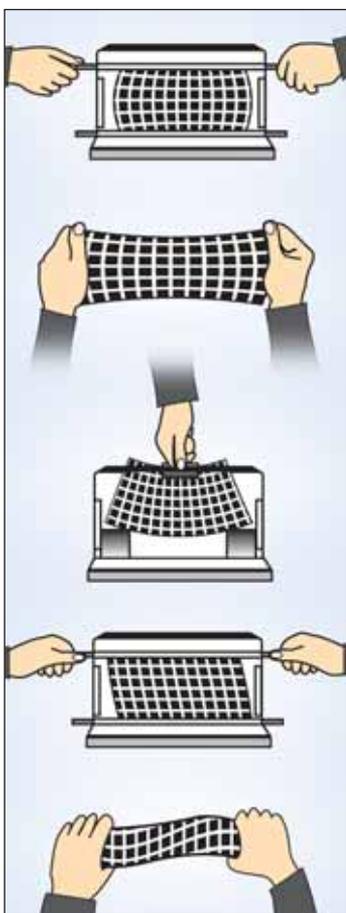


Рис. 213

Тогда

$$F_{упр} \sim x. \quad (\text{П.3.7})$$

Эта зависимость получила в физике название закона Гука.

Сила упругости, возникающая при деформации тела, прямо пропорциональна деформации.

Закон Гука выполняется, если деформация *упругая*, то есть тело возвращается к прежней форме после того, как прекращают сжимать или растягивать тело. Сжатие пружины, растяжение струны, изгиб линейки – это примеры упругих деформаций. «Безвозвратное» изменение формы куска пластилина или железной скрепки – примеры неупругих деформаций. Также деформации должны быть *малыми*. Например, если прочную стальную проволоку длиной 1 м растянуть более чем на 3 мм, то деформация перестанет быть упругой и закон Гука уже не будет выполняться. При дальнейшем же удлинении проволоки произойдёт разрыв – разрушение деформируемого тела.

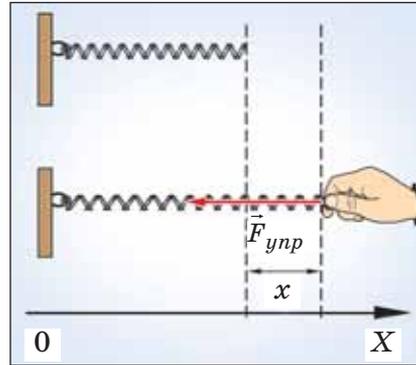


Рис. 214

Для того чтобы соотношение (П.3.7) записать в виде равенства, необходимо ввести коэффициент пропорциональности между силой упругости $F_{упр}$ и величиной деформации x . Обозначим этот коэффициент пропорциональности буквой k и назовём его жёсткостью тела (пружины). Тогда формула закона Гука запишется в виде

$$F_{упр} = - kx. \quad (\text{П.3.8})$$

Жёсткость тела (пружины) измеряется в Н/м.

У разных тел жёсткость различна. Опыт показывает, что жёсткость пружины зависит от рода вещества, из которого изготовлено деформируемое тело. Совершенно ясно, что, например, жёсткость стальной проволоки больше, чем жёсткость такой же по размерам и толщине рыболовной лески или полоски резины. Жёсткость также зависит от площади поперечного сечения и длины деформируемого тела.

Прикрепим груз к пружине динамометра (рис. 215, а). Груз действует на пружину с некоторой силой, и пружина деформируется – растягивается. Между двумя стопками тетрадей положим линейку,



Рис. 215

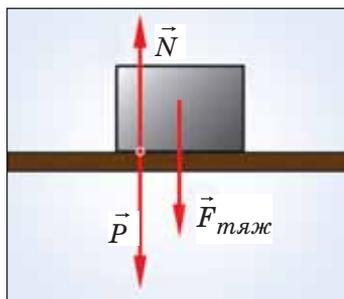


Рис. 216

Наиболее интересным случаем является случай движения тела с ускорением, равным ускорению свободного падения ($\vec{a} = \vec{g}$). В этом случае вес тела равен нулю.

а на неё – книгу (рис. 215, б). Книга будет действовать на линейку с некоторой силой, и линейка деформируется – изогнётся.

Сила, с которой тело растягивает нить подвеса или деформирует опору, называют весом тела. Обратите внимание, что подобное наименование физической величины не является удачным! Сила «*вес тела*» приложена не к телу, а к опоре (или нити подвеса).

Вес тела обозначают буквой \vec{P} . Рассчитаем значение веса тела. С этой целью запишем формулу II закона Ньютона применительно к телу, находящемуся на опоре (рис. 216).

$$m\vec{a} = \vec{F}_{тяж} + \vec{N},$$

$$\vec{F}_{тяж} = m\vec{g}.$$

Тогда

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N}. \quad (\text{П.3.9})$$

По III закону Ньютона тело и опора взаимодействуют силами, равными по величине и противоположными по направлению. Следовательно,

$$\vec{N} = -\vec{P}. \quad (\text{П.3.10})$$

Подставив соотношение (П.3.10) в выражение (П.3.9), имеем

$$\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a}). \quad (\text{П.3.11})$$

Если тело покоится или движется с постоянной скоростью ($\vec{a} = 0$), то вес равен силе тяжести, действующей на тело.

$$\vec{P} = m\vec{g} \quad \text{при} \quad \vec{a} = 0.$$

Если тело движется ускоренно ($\vec{a} \neq 0$), то вес тела может быть как больше, так и меньше силы тяжести.

$$\vec{P} = 0 \quad \text{при} \quad \vec{a} = \vec{g}.$$

Состояние тела, при котором его вес равен нулю, называют невесомостью. В состоянии невесомости тело не давит на опору и не растягивает нить подвеса.

Если на тело действует единственная сила – сила тяжести, то ускорение тела будет равно ускорению свободного падения. Поэтому тела, движущиеся только под действием силы тяжести, находятся в состоянии невесомости (рис. 217).

Сила трения. Без силы трения не обходится большинство механических движений. Перечислим основные сведения о силе трения.

Во-первых, существует сила *трения покоя*. Сила трения покоя – это сила, возникающая при попытке привести в движение покоящееся тело. Это именно та сила, что удерживает от скольжения, например, книгу при небольшом наклоне крышки стола (рис. 218).

Произнося слова «сила трения», мы сразу же представляем силу, «мешающую» движению. Но к силе трения покоя это не относится. Только благодаря силе трения покоя возможно движение людей, автомобилей (рис. 219, а, б).

Во-вторых, при скольжении одного тела по поверхности другого возникает *сила трения скольжения*. Направление силы трения скольжения противоположно направлению движения тела (рис. 220). Величина силы трения скольжения зависит от качества обработки соприкасающихся поверхностей; от того, какие вещества контактируют при скольжении.

Сила трения скольжения зависит ещё и от того, с какой силой движущееся тело давит на опору (от веса тела). Чем больше вес тела, тем больше сила трения скольжения, действующая на тело. Опыт свидетельствует: во сколько раз увеличивается вес тела, во столько же раз увеличивается и сила трения скольжения.

Если тело действует на опору силой вес тела \vec{P} , то деформированная опора, в свою очередь, действует на тело силой реакции \vec{N} . По III закону Ньютона

$$\vec{P} = -\vec{N}.$$



Рис. 217. Состояние невесомости в космическом корабле. Космический корабль, космонавт и предметы в корабле движутся с одинаковым ускорением – ускорением свободного падения

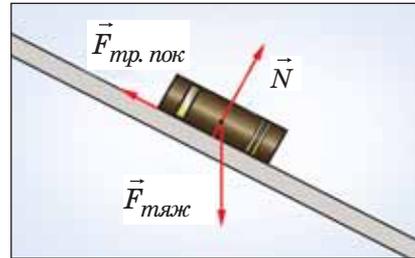


Рис. 218

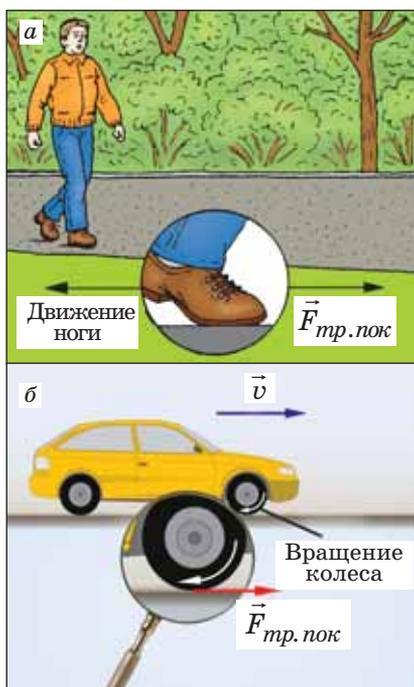


Рис. 219

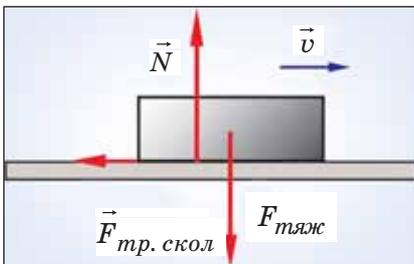


Рис. 220

Таким образом, можно сделать вывод, что величина силы трения скольжения $\vec{F}_{тр.скол}$ зависит от величины силы реакции N . Математически данную зависимость можно выразить следующим образом:

$$F_{тр.скол} \sim N. \quad (\text{П.3.12})$$

Для того чтобы записать соотношение (П.3.12) в виде равенства, необходимо ввести коэффициент пропорциональности между силой трения скольжения и силой реакции. Обозначают этот коэффициент пропорциональности, как правило, буквой μ и называют его коэффициентом трения скольжения.

Тогда соотношение (П.3.12) примет вид

$$F_{тр.скол} = \mu N. \quad (\text{П.3.13})$$

4. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

Импульс. Закон сохранения импульса. Реактивное движение. Среди множества физических величин есть особые величины, значения которых при определённых условиях являются неизменными, сохраняющимися. Для подобных величин установлены **законы сохранения**. Одной из таких величин является импульс – векторная физическая величина, являющаяся мерой механического движения.

Импульс тела – это физическая величина, равная произведению массы тела на его скорость.

Импульс принято обозначать буквой \vec{p} .

$$\vec{p} = m \vec{v} . \quad (\text{П.4.1})$$

Единица измерения импульса – 1 кг·м/с.

Одним из важнейших законов механики является закон сохранения импульса. Этот закон формулируют применительно к замкнутой системе тел. Любую группу взаимодействующих тел в физике называют системой тел. Если же тела системы взаимодействуют только между собой и никакие внешние тела на них не действуют, то такую систему называют замкнутой.

Для замкнутой системы тел выполняется закон сохранения импульса.

Векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, есть величина неизменная при любых взаимодействиях тел этой системы между собой.

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 + \vec{p}_4 + \dots = \vec{p}_{01} + \vec{p}_{02} + \vec{p}_{03} + \vec{p}_{04} + \dots . \quad (\text{П.4.2})$$

Приведём теоретический вывод закона сохранения импульса для случая системы, состоящей из двух тел (рис. 221). Пусть тела взаимодействуют только между собой и никакие другие тела на них не действуют (замкнутая система тел). По III закону Ньютона тела взаимодействуют с силами, равными по величине и противоположными по направлению:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2 . \quad (\text{П.4.3})$$

По II закону Ньютона:

$$\begin{aligned} \vec{F}_1 &= m_1 \vec{a}_1 , \\ \vec{F}_2 &= m_2 \vec{a}_2 . \end{aligned}$$

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{v}_1 - \vec{v}_{01}}{t} ,$$

$$\vec{a}_2 = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_{02}}{t} .$$

Тогда

$$\vec{F}_1 = \frac{m_1(\vec{v}_1 - \vec{v}_{01})}{t} ,$$

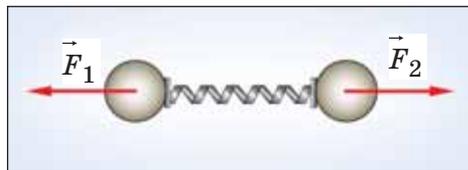


Рис. 221

$$\vec{F}_2 = \frac{m_2(\vec{v}_2 - \vec{v}_{02})}{t}.$$

Подставим полученные соотношения в формулу III закона Ньютона (П.4.3):

$$\frac{m_1(\vec{v}_1 - \vec{v}_{01})}{t} = \frac{m_2(\vec{v}_2 - \vec{v}_{02})}{t}.$$

Отсюда

$$m_1 \vec{v}_1 - m_1 \vec{v}_{01} = -m_2 \vec{v}_2 + m_2 \vec{v}_{02}.$$

Или

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02}.$$

С учётом определения импульса имеем

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_{01} + \vec{p}_{02}. \quad (\text{П.4.4})$$

Известным примером проявления закона сохранения импульса является реактивное движение. **Реактивное движение** – это движение тела, возникающее при отделении от тела части его массы с некоторой скоростью.

Именно благодаря реактивному движению возможен запуск искусственных спутников Земли, космических кораблей, межпланетных станций на требуемую орбиту. Допустим, стартует ракета, имеющая массу корпуса m_p и наполненная топливом массой m_T (рис. 222). Для простоты расчёта предположим, что всё топливо сгорает очень быстро и образовавшиеся раскалённые газы вылетают из ракеты со скоростью v_T . При этом ракета приобретает скорость v_p (рис. 222).

В соответствии с законом сохранения импульса

$$m_p \vec{v}_p + m_T \vec{v}_T = 0. \quad (\text{П.4.5})$$

Направим ось координат вертикально вверх и запишем соотношение (П.4.5) в проекции на выбранную ось.

$$m_p v_p - m_T v_T = 0,$$

$$m_p v_p = m_T v_T,$$



Рис. 222

$$v_p = \frac{m_T v_T}{m_p}. \quad (\text{П.4.6})$$

Как видно из формулы (П.4.6), скорость ракеты будет тем больше, чем больше скорость вылета сгоревшего топлива и его масса.

Можно ли определить скорости тел, которые они имеют после взаимодействия, не прибегая к закону сохранения импульса? Конечно же, да. Зная силу, действующую на тело, можно, применив II закон Ньютона, вычислить ускорение тела. Если же известно ускорение тела, то не составит большого труда определить и скорость тела. При таком подходе к решению задачи необходимо знать силы, с которыми взаимодействуют тела, и знать, как эти силы меняются в процессе взаимодействия тел. Однако закон изменения сил при взаимодействии может быть неизвестен или крайне сложен математически. В этом случае намного проще поставленная задача расчёта движения взаимодействующих тел решается благодаря закону сохранения импульса. Ведь для того чтобы применить закон сохранения импульса, не нужно анализировать сам процесс взаимодействия. Достаточно лишь знать, каковы импульсы тел «до» и «после» их взаимодействия.

Механическая энергия. Работа. Мощность. При описании самых разных явлений природы используется такая физическая величина, как «энергия».

Энергия – это общая количественная мера движения и взаимодействия всех видов материи.

Существуют различные виды энергии – *механическая энергия, тепловая энергия, энергия электромагнитного взаимодействия, ядерная энергия* и так далее. Как вы знаете, механическую энергию движущегося тела называют *кинетической энергией*. Механическую энергию тел, взаимодействующих силами тяготения или упругости, называют *потенциальной энергией*.

Кинетическая энергия E_k .

Кинетическая энергия движущегося тела вычисляется по формуле

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (\text{П.4.7})$$

Чем больше масса m и скорость v движения тела, тем больше его кинетическая энергия.

Потенциальная энергия E_n .

Потенциальная энергия E_n , которой обладают витки деформированной пружины, *взаимодействующие силой упругости*, вычисляется по формуле

$$E_n = \frac{kx^2}{2}, \quad (\text{П.4.8})$$

где k – жёсткость пружины;

x – величина деформации (сжатия или растяжения) пружины.

Формула (П.4.8) применима только в том случае, когда сила упругости, возникающая при деформации тела, подчиняется закону Гука.

Потенциальная энергия Земли и некоторого тела, *взаимодействующих силой тяготения*, вычисляется по формуле

$$E_n = mgh, \quad (\text{П.4.9})$$

где g – ускорение свободного падения;

m – масса тела, поднятого над поверхностью Земли на высоту h .

Формула (П.4.9) применима только в том случае, когда высота подъёма тела h во много раз меньше радиуса Земли R_3 .

Для количественной характеристики действия, производимого силой, приложенной к телу, введена скалярная физическая величина – **механическая работа**.

Если на тело действует постоянная сила \vec{F} и направление силы составляет с направлением перемещения тела \vec{S} угол α (рис. 47), то механическую работу можно рассчитать следующим образом:

$$A = |\vec{F}| \cdot |\vec{S}| \cos\alpha. \quad (\text{П.4.10})$$

Механическая работа, совершённая постоянной силой при перемещении тела, равна произведению модуля силы и модуля перемещения, умноженному на косинус угла между вектором силы и вектором перемещения.

Формула (П.4.10) позволяет установить связь единицы измерения работы – джоуль – с основными единицами СИ – килограмм, метр и секунда.

$$\text{Дж} = \text{Н} \cdot \text{м}.$$

Из II закона Ньютона вытекает, что

$$\text{Н} = \text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2,$$

тогда

$$\text{Дж} = \text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2.$$

Если на тело действует сила, то тело движется ускоренно и его скорость изменяется. Следовательно, изменяется и кинетическая энергия тела. *Механическая работа силы, действующей на тело, равна изменению кинетической энергии тела, произошедшему под дейст-*

виет этой силы. Обозначим механическую работу, совершённую силой, действующей на тело, буквой A , начальную кинетическую энергию тела – $E_{к0}$, а конечную кинетическую энергию – $E_к$.

Тогда

$$A = E_к - E_{к0}. \quad (\text{П.4.11.})$$

Ещё одна механическая величина – мощность. **Мощность – величина, характеризующая быстроту совершения работы.** Если за время t силой совершена работа A , то мощность N будет равна

$$N = \frac{A}{t}. \quad (\text{П.4.12})$$

Единица измерения мощности – ватт.

Закон сохранения механической энергии. Учёными установлен один из фундаментальных законов природы – закон сохранения энергии.

В изолированной системе энергия может переходить из одной формы в другую, но общее количество энергии остаётся постоянным.

Рассмотрим систему тел, которые взаимодействуют между собой только силами тяготения и упругости (сила трения отсутствует). Например, прикрепим к вертикально расположенной пружине груз и предоставим возможность грузу совершать движение под действием силы упругости и силы тяжести (рис. 223). Если не учитывать влияние воздуха на движение груза и витков пружины, то Земля, пружина и груз образуют замкнутую систему тел, взаимодействующих силами тяготения и упругости.

Пусть силами тяготения и упругости совершена положительная работа A . Это приведёт к увеличению кинетической энергии системы. Если $E_{к0}$ – начальная кинетическая энергия, а $E_к$ – конечная кинетическая энергия системы, то

$$E_к > E_{к0}$$

и

$$A = E_к - E_{к0}. \quad (\text{П.4.13})$$

Совершение положительной механической работы силами тяготения и упругости

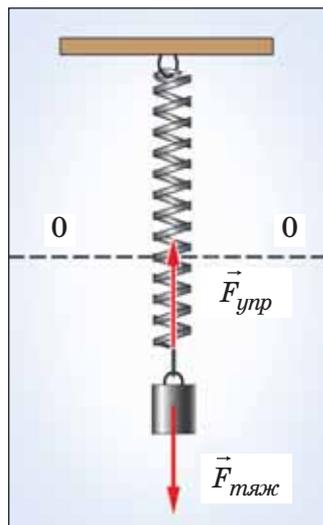


Рис. 223

приводит к уменьшению потенциальной энергии взаимодействующих тел.

Если E_{n0} – начальная потенциальная энергия, а E_n – конечная потенциальная энергия системы, то

$$E_n < E_{n0}$$

и

$$A = E_{n0} - E_n. \quad (\text{П.4.14})$$

Из соотношений (П.4.13) и (П.4.14) следует, что

$$E_k - E_{k0} = E_{n0} - E_n$$

или

$$E_k + E_n = E_{k0} + E_{n0}. \quad (\text{П.4.15})$$

Последнее соотношение и является математическим выражением закона сохранения механической энергии.

Полная механическая энергия замкнутой системы тел, взаимодействующих силами тяготения и упругости, есть величина неизменная.

Заключение

Все жалуются на свою память, но никто не жалуется на свой разум.

*Из книги «Максимы и моральные размышления»
французского писателя-моралиста
Франсуа де Ларошфуко (1613–1680)*

В курсе физики десятого класса рассмотрены на более глубоком уровне как уже известные вам понятия, так и изучены новые для вас физические явления. Учебник физики десятого класса дал достаточно пищи и вашей памяти, и вашему разуму.

Впервые вы столь основательно познакомились с одной из физических моделей (модель идеального газа) и с её помощью последовательно получили некоторые теоретические результаты (зависимость давления идеального газа от концентрации газа и средней кинетической энергии поступательного движения молекулы газа, уравнение состояния идеального газа) и проверили их на опыте (изучение изобарного процесса).

Изучение свойств электрического поля и электрического тока позволило ввести основные характеристики электрического поля (напряжённость, потенциал) и подойти к теоретическому обоснованию основных законов электротехники – закона Ома для участка цепи и закона Ома для полной цепи.

При рассмотрении вопросов, связанных с прохождением электрического тока в различных средах, удалось применить основные положения МКТ к выводу законов электролиза и использовать представления квантовой физики для объяснения механизма собственной и примесной проводимости полупроводников.

Впервые рассмотрение магнетизма проведено не только на качественном, но и на количественном уровне – введена физическая величина, характеризующая магнитное поле, записаны формулы для расчёта силы, действующей на движущийся электрический заряд или проводник с током, находящийся в магнитном поле.

В одиннадцатом классе вы изучите:

– Механические и электромагнитные колебания и волны. При рассмотрении этих вопросов будет использован более высокий уровень ваших математических знаний (такой возможности мы были лишены в 9 классе, где уже знакомы с колебаниями и волнами).

– Геометрическую и физическую оптику.

– Элементы релятивистской и квантовой физики.

Перед тем как попрощаться с учебником «Физика-10», советуем вам:

- Ещё раз в конце каждого раздела прочитать «Самое важное».
- Ещё раз прочитать эпиграфы к параграфам и прокомментировать, как они связаны с содержанием соответствующего параграфа.
- Выполнить итоговые задания.

Итоговое задание 1. По плану ответа подготовьте ответ о явлении:

- теплового движения,
- испарения жидкости и конденсации пара,
- анизотропии,
- электрического взаимодействия,
- электрического тока,
- магнитного взаимодействия.

Итоговое задание 2. По плану ответа подготовьте ответ:

- о первом законе термодинамики,
- о втором законе термодинамики,
- о законе Кулона,
- о законе Ома для участка цепи,
- о законе Ома для полной цепи.

Итоговое задание 3. По плану ответа подготовьте ответ о величинах, указанных в таблице на заднем форзаце учебника.

Итоговое задание 4. По плану ответа подготовьте ответ об опыте, который подтверждает:

- уравнение состояния идеального газа,
- изменение температуры идеального газа при адиабатном процессе,
- зависимость энергии электрического поля конденсатора от ёмкости конденсатора и величины напряжения, до которого заряжен конденсатор,
- зависимость сопротивления металлического проводника от его температуры,
- одностороннюю проводимость полупроводникового диода,
- правило левой руки для определения направления силы Ампера.

Итоговое задание 5. По плану ответа подготовьте ответ:

- о манометре,
- о психрометре,
- о конденсаторе,
- о люминесцентной лампе,
- о термисторе,
- о полупроводниковом диоде,
- об электродвигателе постоянного тока.

Спасибо за работу!

До встречи в одиннадцатом классе.

Ответы к заданиям

2.1. $(1,4 \pm 0,2)$ Н. 2.2. (16 ± 3) Ом. 2.3. 0,005; 0,016 %. 3.1. 0,032 кг/моль; 0,42 кг; 13 моль; $7,9 \cdot 10^{24}$; $4,0 \cdot 10^{27}$ м⁻³; $5,3 \cdot 10^{-26}$ кг. 3.2. 5,4 мг.
 3.4. $2 \cdot 10^{17}$ кг/м³. 3.5. 40. 4.1. $2,8 \cdot 10^{-20}$ Дж. 4.2. В 4 раза. 4.3. $1,1 \cdot 10^5$ Па.
 4.4. 2500 К. 4.5. 10^{32} м⁻³. 5.1. 120 Н. 5.2. 1,3 МПа. 5.3. 625 °С.
 5.5. 2,0 моль. 6.1. 120 К. 6.2. На 16 г; $3 \cdot 10^{23}$. 6.4. На 160 Па. 7.2. 66 %;
 1,5 кПа. 7.4. 0,59 кг/м³. 7.5. 41 %; 0,7 г. 8.3. 7,3 мН. 8.5. На 60 мм.
 9.5. От 1800 до 107 000. 10.1. 200 кН/м. 10.2. Не выдержит.
 10.3. 136 м. 10.4. 0,8 мм. 11.1. 7,5 кДж. 11.2. 2,7 МДж. 11.3. 2,5 кДж.
 11.4. 1,6 кДж. 12.1. 3,5 Дж. 12.2. 43 МДж/кг. 12.3. 20 °С. 12.4. 20 000 К.
 13.1. 5 %; 5 кВт. 13.2. 1000 К. 13.4. 38 %. I.1. $2 \cdot 10^{27}$. I.5. $P_0 V_0$.
 14.1. 16 мкН. 14.2. $4,8 \cdot 10^{-17}$ Дж. 14.3. 50 кВ/м. 14.4. 100 В; увеличилась на $3,2 \cdot 10^{-17}$ Дж. 15.1. 220 В. 15.2. 20 Мм/с. 15.4. $4,8 \cdot 10^6$ м/с.
 15.5. 10 см. 16.1. 2 мН. 16.2. 0,3 нм. 16.3. 82 нН; $5,1 \cdot 10^{11}$ В/м; 27 В.
 16.4. 1,8 нКл. 16.5. $6,1 \cdot 10^{-16}$ м. 17.1. 25 мКл. 17.2. 200 В. 17.3. 66 мкКл.
 17.4. 2; 4; 6; 4/3; 3/2; 12/5; 8; 10; 12/11; 12; 5/3; 8/3; 3; 22/3; 11/3;
 22/5 мкФ. 17.5. $\frac{q^2}{2C}$; $\frac{q^2}{4C}$. 18.1. 36 Кл; 12 В; 0,86 кДж; 1,3 кДж; 7,2 Вт.
 18.2. 20 Ом. 18.3. Показания вольтметров V_1 , V_2 , V_3 равны соответственно 4, 18, 22 В; показания амперметров A_2 , A_3 соответственно равны 0,2; 0,6 А. 18.4. 0,5; 0; 0,25 А. 19.1. 140 Ом. 19.2. 590 Вт.
 19.3. 0,44 мм. 19.4. $0,5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. 19.5. 17 см. 20.2. 270 Дж. 20.3. 0,5 А; 5,5 В. 20.4. 600 А. 20.5. 0,29 Вт; 0,012 Вт. 21.1. 1 А; 4 В; показание амперметра возрастёт, показание вольтметра уменьшится.
 21.2. Показание амперметра уменьшится, показание вольтметра возрастёт. 21.3. 12 В; 1 Ом. 21.5. 40 В; 10 кВт. 22.2. $3 \cdot 10^7$ м/с; 0,45 Вт.
 22.3. 12 см. 23.3. 12 см. 24.3. 0,26 мм. 25.3. 2 мин. 26.1. 0,5 мА.
 27.1. 80 мВ/м. 27.2. 4,3 В; 4,5 В. 27.3. 0,5 мА. II.1. 220 В. II.3. 90 Кл.
 II.4. R. II.5. 10 А. 28.3. 60 мкТл. 28.4. 36 мкТл. 29.1. $1,2 \cdot 10^{-13}$ Н.
 29.3. 7,2 см. 30.1. 7,5 мН. 30.2. 31 мТл. 30.4. На 2 мм.

Предметно-именной указатель

А

Абсолютный нуль температуры 35

Авогадро А. 28

Адиабата 100

Аморфное состояние 83

Ампер А. М. 233

Анизотропия 76

Б

База транзистора 226

Больцман Л. 36

В

Вакуум 181

Вектор магнитной индукции 234, 235

Вернадский В. И. 9

Вес 286

Взаимодействие гравитационное 122

- магнитное 233

- электрическое 124

Влажность 62

- относительная 62

Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода 222

Г

Газ идеальный 34

- реальный 58

Галилей Г. 277

Громкоговоритель 261

Гук Р. 85

Д

Давление идеального газа 40

- насыщенного пара 60

Двигатель постоянного тока 262

- тепловой 112

Движение

- криволинейное 274

- механическое 269

- неравномерное 272

- равномерное 270

- равноускоренное 272

- реактивное 290

- тепловое 35

Дефект в кристалле точечный 78

Дислокация винтовая 79

- краевая 80

Деформация пластическая 85

- упругая 85

Диод полупроводниковый 221

Диссоциация электролитическая 200

Диффузия 28

Домены 240

Дырка в полупроводнике 215

Ж

Жёсткость тела 85, 5

З

Закон

- всемирного тяготения 281

- Гука 85, 285

- Джоуля и Ленца 162

- Кулона 141, 142

- Ньютона

- - второй 278

- - первый 276, 277

- - третий 279

- Ома для полной цепи 172

- - для участка цепи 158

- сохранения импульса 289

- - механической энергии 294

- - электрического заряда 124

- - энергии 293

- статистический 39

- термодинамики второй 109

- - первый 96, 102

- электролиза 202

Замкнутая система тел 292

Запас прочности 88

Заряд электрический 124

- - точечный 125, 141

- электрона 124
- Зона валентная 211
- запрещённая 211
- проводимости 211
- энергетическая 210
- Зонная теория 208
- Запирающий слой p - n -перехода 220
- И**
- Измерение прямое 15, 16
- косвенное 15, 18
- Изобара 49
- Изотерма 49
- Изотропия 83
- Изохора 49
- Импульс 289
- Интегральная схема 225
- Ионизация электронным ударом 194
- Испарение 59
- К**
- Камерлинг-Оннес Х.* 190
- Капилляр 73
- Карно Н. Л. С.* 114
- Кипение 64
- Клапейрон Б. П. Э.* 44
- Клаузиус Р. Ю. Э.* 109
- Ключевой режим работы транзистора 226
- Количество вещества 29
- теплоты 96
- Коллектор транзистора 226
- Конденсатор 147
- переменной ёмкости 149
- электролитический 149
- Конденсация 58
- Концентрация 30
- Короткое замыкание 174
- Коэффициент полезного действия 113
- максимальный 114
- Кристалл 75
- жидкий 81
- Кулон (единица измерения) 124
- Кулон Ш.* 142
- Л**
- Линии силовые магнитной индукции 236
- - электрического поля 129
- Ломоносов М. В.* 8
- Лоренц Х. А.* 246
- М**
- Магнетрон 183
- Макропараметр 42
- Максвелл Д. К.* 38
- Масса молярная 29
- Масс-спектрограф 248, 251
- Менделеев Д. И.* 44
- Модель 12
- идеального газа 34
- материальная 12
- теоретическая 12
- Моль вещества 28
- Мощность 114, 293
- электрического тока 162
- Н**
- Нагреватель теплового двигателя 112
- Напряжение механическое 86
- электрическое 128
- Напряжённость электрического поля 126
- Невесомость 287
- Необратимость тепловых процессов 109
- Ньютон И.* 276
- О**
- Ом Г. С.* 158
- Относительность механического движения 269
- П**
- Пар
- насыщенный 60
- ненасыщенный 60

- Перемещение 269
Период вращения 275
Плотность 32
Поверхностное натяжение 69
Поверхность эквипотенциальная 130
Погрешность измерения абсолютная 16
- - относительная 17
Полимеры 83
Поле магнитное 234
- потенциальное 129
- электрическое 125
- - однородное 130
- электростатическое 125
Полупроводник 207
- *n*-типа 217
- *p*-типа 217
- *p-n*-переход 219
Постоянная Авогадро 28
- Больцмана 36
- газовая 43, 44
- гравитационная 122, 281
- электрическая 142
Потенциал электрического поля 127
Правило буравчика 235
- левой руки 244, 256
- Ленца 239
Предел прочности 86
Примесь
- акцепторная 217
- донорная 217
Принцип относительности Галилея 277
Проводимость
- дырочная 215
- примесная 215
- собственная 215
- электронная 187, 214
Проекция вектора 270
Проницаемость диэлектрическая 143
Психрометр 62
Путь 269
Р
Работа механическая 93, 292
- газа 94, 95
- тока 161
Разряд дуговой (электрическая дуга) 193, 194
- искровой 194
- коронный 197
- несамостоятельный 193
- самостоятельный 193
- тлеющий 197
Распределение молекул по энергиям 38
Решётка кристаллическая 75, 186
Румфорд Б. 13
С
Сахаров А. Д. 252
Сверхпроводимость 190
- высокотемпературная 191
Сила Ампера 256
- всемирного тяготения 281
- Лоренца 245
- поверхностного натяжения 69
- равнодействующая 279
- сторонняя 170
- тока 155
- трения 287
- тяжести 282
- упругости 284
- электродвижущая 170
Система замкнутая 289
- координат 269
- отсчёта 269
- - инерциальная 277
- - неинерциальная 277
- термодинамическая 92
Скорость квадратичная 37

- мгновенная 272
- первая космическая 283, 284
- равномерного движения 270
- соединение конденсаторов параллельное 153
 - - последовательное 153
 - проводников параллельное 160
 - - последовательное 159
- Сопротивление внутреннее источника тока 171
 - проводника 158
 - - удельное электрическое 165
- Т**
- Тамм И. Е.* 252
 - рабочее теплового двигателя 112
 - свободное 276
- Температура 35
 - абсолютная 35
 - критическая 59
- Теплоёмкость удельная 104
- Теплообмен 95
- Термодинамика 92
- Терморезистор (термистор) 207
- Термоэлектронная эмиссия 181, 182
- Тесла (единица измерения) 235
- Тесла Н.* 235
- Токамак 252
- Ток электрический 155
- Томсон У. (лорд Кельвин)* 35
- Траектория 269
- Транзистор биполярный 225, 226
- Трубка электронно-лучевая 184
- У**
- Уравнение состояния идеального газа (Клапейрона – Менделеева) 44
- Ускорение равноускоренного движения 272
 - свободного падения 282
 - центростремительное 275
- Ускоритель заряженных частиц 251
- Ф**
- Фарад (единица измерения) 150
- Фарадей М.* 125
- Ферромагнетик 240
- Фоторезистор 208
- Фотоэлемент 223
- Х**
- Холодильник теплового двигателя 112
- Ч**
- Частота вращения 275
- Ш**
- Шкала температур абсолютная 35
 - Цельсия 35
- Э**
- Электрическая ёмкость 148
- Электродвигатель асинхронный трёхфазный 262
 - постоянного тока 262
- Электролиз 201
- Электролит 200
- Электронная лавина 195
- Эмиттер транзистора 226
- Энергия 291
 - внутренняя 92
 - кинетическая 291
 - поверхностная 68
 - потенциальная 291, 292
 - средняя кинетическая молекул 36
 - электрического поля 150, 151
- Энтропия 111
- Эрстед Х. К.* 233
- Я**
- Явление капиллярное 72
 - несмачивания 72
 - поверхностного натяжения 67
 - смачивания 72

Оглавление

Как работать с учебником	3
Введение	7
§ 1. Физика – наука о природе	8
§ 2. Измерения в физике	15
Раздел 1. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА	
§ 3. Основные положения молекулярно-кинетической теории	27
§ 4. Молекулярно-кинетическая теория идеального газа. Температура	33
§ 5. Уравнение состояния идеального газа	41
§ 6. Лабораторная работа «Изучение изобарного процесса»	53
§ 7. Реальные газы. Влажность воздуха. Кипение	57
§ 8. Поверхностное натяжение	67
§ 9. Твёрдые тела	74
§ 10. Упругие свойства твёрдых тел	84
§ 11. Первый закон термодинамики	91
§ 12. Решение задач по теме «Первый закон термодинамики»	101
§ 13. Второй закон термодинамики	108
Самое важное в разделе «Молекулярная физика»	117
P. S.	119
Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ	
§ 14. Электрическое поле	122
§ 15. Решение задач по теме «Характеристики электрического поля»	134
§ 16. Закон Кулона	141
§ 17. Конденсаторы	147
§ 18. Постоянный электрический ток	155
§ 19. Электрическое сопротивление	164
§ 20. Закон Ома для полной цепи	168
§ 21. Лабораторная работа «Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока»	174
§ 22. Ток через вакуум	181
§ 23. Ток в металлах	185
§ 24. Ток в газах	192
§ 25. Ток в электролитах	199
§ 26. Полупроводники	207
§ 27. p – n -Переход	219
Самое важное в разделе «Электрические явления»	229
P. S.	231

Раздел 3. ОСНОВЫ МАГНЕТИЗМА

§ 28. Магнитное поле	233
§ 29. Сила Лоренца.....	243
§ 30. Сила Ампера	255
Самое важное в разделе «Основы магнетизма»	265
P. S.	267

Приложение. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МЕХАНИКИ

1. Механическое движение. Виды движения	269
2. Законы Ньютона.....	276
3. Силы в механике	280
4. Законы сохранения в механике	288
Заключение	295
Ответы к заданиям	297
Предметно-именной указатель	298

Андрюшечкин Сергей Михайлович

Физика
10 класс

Базовый уровень

Общероссийский классификатор продукции ОК-005-93,
том 2; 953005 – литература учебная

Издатель С. М. Андрюшечкин. E-mail: asm57@mail.ru

Электронный аналог печатного издания