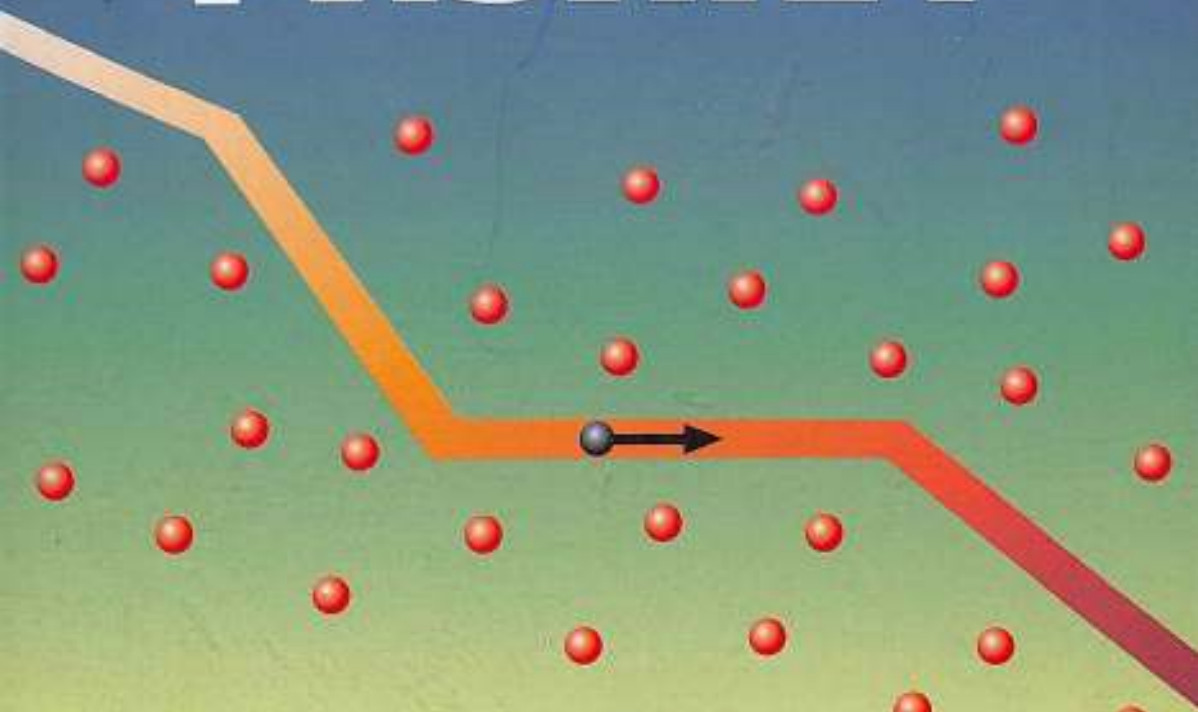
ФИЗИКА



10

ПРОСВЕЩЕНИЕ
издательство

ФГОС

ФИЗИКА

10 класс

Учебник для общеобразовательных организаций

Углублённый уровень

Под редакцией А. А. Пинского, О. Ф. Кабардина

Рекомендовано
Министерством образования и науки
Российской Федерации

Москва
«Просвещение»
2014

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72
Ф50

На учебник получены **положительные заключения** по результатам **научной** (заключение РАН № 017-н от 29.01.2014), **педагогической** (заключение РАО № 420 от 29.01.2014) и **общественной** (заключение РКС № 417 от 07.02.2014) экспертиз.

Авторы: О. Ф. Кабардин, В. А. Орлов, Э. Е. Эвенчик, С. Я. Шамаш, Н. И. Шефер, С. И. Кабардина

В научном редактировании активное участие приняли: д-р пед. наук, канд. физ.-мат. наук М. Ю. Королёв, д-р пед. наук Е. Б. Петрова

Физика. 10 класс : учеб. для общеобразоват. организаций : Ф50 углубл. уровень / [О. Ф. Кабардин, В. А. Орлов, Э. Е. Эвенчик и др.] ; под ред. А. А. Пинского, О. Ф. Кабардина. — М. : Просвещение, 2014. — 416 с. : ил. — ISBN 978-5-09-034236-0.

В учебнике, начинающем предметную линию учебно-методических комплектов по физике для учащихся 10—11 классов, рассмотрены вопросы классической механики, молекулярной физики, электродинамики.

Учебный материал содержит задания, позволяющие обеспечить достижение личностных, метапредметных и предметных результатов образования.

Учебник соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта среднего (полного) общего образования и реализует углублённый уровень образования учащихся 10 класса.

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72

ISBN 978-5-09-034236-0

© Издательство «Просвещение», 2014
© Художественное оформление. Издательство «Просвещение», 2014
Все права защищены

Как работать с учебником

Постарайтесь при чтении понять основную суть изложенного материала. Кое-что надо выучить наизусть, например определения физических величин, законы, основные формулы. Потеря даже одного символа в формуле делает её бессмысленной.

Мы постарались удобно структурировать учебные материалы, используя следующие условные обозначения:

ЗАПОМНИТЕ — определения и формулировки, которые необходимо запомнить

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ — фрагменты текста, на которые надо обратить особое внимание

ИНТЕРЕСНО — дополнительные сведения

* — параграфы или фрагменты текста для дополнительного чтения

 — ключевые слова — слова, несущие главную смысловую нагрузку по изложенной теме, по которым вы можете найти дополнительный материал в Интернете

 — вопросы, на которые нужно ответить, изучив текст параграфа

 — примеры решения задач

РЕШИТЕ — задачи для самостоятельного решения

 — предложение провести простые опыты, обратить внимание на явления, наблюдаемые в повседневной жизни

 — темы докладов на дополнительных занятиях, которые могут быть проведены в виде круглых столов, интернет-конференций и т. п.

 — описание возможной проектной и исследовательской деятельности

ОТВЕТЬТЕ НА ИТОГОВЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ — подведение итогов главы по вопросам

ЕГЭ — тесты, аналогичные тестам ЕГЭ, которые помогут вам оценить качество ваших знаний и умений, а также составить представления об уровне сложности заданий на ЕГЭ

Введение. МЕТОДЫ НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ И ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

§ 1. Эксперимент и теория в процессе познания природы

Зарождение физики. Слово «физика» произошло от греческого слова *physis* — природа. Первым в Европе физиком считается Фалес (640—550 гг. до н. э.) из греческого города Милета. Фалес изучал явление притяжения магнитом железа, притяжения тел после натирания янтарём, высказал гипотезы о строении вещества и Вселенной. На протяжении около четырёх столетий учёные-философы Древней Греции, от Фалеса Милетского до Архимеда, достигли замечательных успехов в познании окружающего мира.



Фалес Милетский

Из наблюдений самых простых, повседневных явлений Левкипп и Демокрит (460—370 гг. до н. э.) сумели прийти к правильным выводам об атомном строении вещества, Пифагор (582—500 гг. до н. э.) высказал догадку о шарообразности Земли, а Эратосфен (276—195 гг. до н. э.) измерил радиус Земли. За 18 столетий до Николая Коперника Аристарх Самосский (около 280-х гг. до н. э.) утверждал, что Солнце находится в центре мира, а Земля движется вокруг него. Архимед (287—212 гг. до н. э.) сделал много замечательных изобретений в механике, открыл условия плавания тел и даже изготовил первый планетарий, демонстрирующий движение Луны и планет, явление затмения Солнца.



Демокрит

При всём восхищении достижениями древнегреческих учёных необходимо обратить внимание, что значительных успехов они достигли в области математики и астрономии, а в области физики высказали лишь общие смелые гипотезы. Этот факт объясняется существенными различиями роли опыта в развитии математики и физики.

Опыт и теория в математике. Математика как наука оперирует такими абстрактными понятиями, как точка, линия,

плоскость, поверхность, число, множество и многими другими. Эти термины общепонятны, так как сформировались на основе практических действий человека с предметами материального мира. Если абстрактные математические понятия и правила действий с ними определены логически непротиворечиво, то появляется возможность выводить логические следствия о свойствах математических понятий и результатах действий с ними по выбранным правилам. При удачно выбранных определениях математических понятий и правил действий с ними с помощью математики могут быть получены результаты, полезные в человеческой практике. Такие результаты были получены ещё во времена Древнего Вавилона и в эпоху строительства египетских пирамид.



Архимед

Однако результаты, получаемые в математике, необязательно сразу находят практическое применение, а многие её важнейшие аксиомы и выводы, полученные на основании этих результатов, не могут быть ни подтверждены, ни опровергнуты на опыте.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Мир математики — самостоятельный, абстрактный, придуманный мир. Опровергнуть какое-либо математическое утверждение можно лишь внутри этого мира обнаружением логических противоречий в определениях понятий или последовательности логических действий и заключений.

Бессмысленным является спор о том, какая геометрия «правильная» — геометрия Евклида, в которой через одну точку вне прямой проходит одна и только одна прямая, не пересекающаяся с первой прямой, или геометрия Лобачевского, в которой таких прямых много, или геометрия Римана, в которой нет ни одной такой прямой. Все три геометрии одинаково «правильные», так как в них нет логических ошибок или противоречий.

Можно рассмотреть вопрос о том, какая из этих геометрий пригодна для использования в физике при описании свойств материального мира. Однако, если в изученной части Вселенной оказывается применимой, например, геометрия Евклида, это вовсе не означает «неправильность» других геометрий. Они могут оказаться полезными при расширении наших знаний о мире. Но если даже и не будет найден в природе объект, для описания которого была бы пригодна одна из созданных геометрий, это не сделает такую геометрию «неправильной», она останется одной из мыслимых геометрий.

Опыт и теория в физике. В отличие от математики для возникновения физики как самостоятельной науки одних лишь наблюдений за природными явлениями, размышлений над их результатами и логических рассуждений оказалось недостаточно.

Пример с построением систем из абстрактных моделей в геометрии показывает, что логически непротиворечивыми могут быть различные взаимоисключающие теории, претендующие на описание одних и тех же фактов. Именно такими были результаты усилий древнегреческих учёных при их попытках объяснить все физические свойства окружающего мира на основе

очень небольшого числа простых опытных фактов. Одни из них считали все тела состоящими из одинаковых неделимых и неразрушимых атомов, отличающихся друг от друга лишь размерами и формой, другие полагали, что видов атомов бесконечно много и свойства их различны, третьи отрицали возможность существования атомов и видели весь мир заполненным единой праматерией с различной плотностью в разных телах, но без малейших участков пустоты. Даже самые смелые гипотезы современных физиков, от гипотезы Большого взрыва и расширяющейся Вселенной до обсуждения возможности рождения звёзд и галактик в результате столкновения двух сверхэнергичных элементарных частиц, не удивили бы древнего грека Анаксагора, учителя Перикла. Анаксагор учил, что бесконечно не только разнообразие материальных частиц, но и каждая отдельная частица подобна целому, заключает в себе качества всего существующего и в этом смысле содержит в себе бесконечность. По представлениям Анаксагора, Вселенная непрерывно увеличивается в размерах, неограниченно расширяясь, а каждая отдельная частица допускает возможность беспредельного деления.



Роджер Бэкон

Таким образом, отправляясь от одной исходной точки, возможные пути познания в форме построения гипотетических физических моделей расходятся в разные, часто противоположные стороны. Но в физике в отличие от математики нельзя признать, что разные теоретические модели строения мира имеют равные права на существование, так как физические модели претендуют на описание действительных свойств реально существующего мира, а мир мы знаем лишь один.



Леонардо да Винчи

Эксперимент как критерий истинности теории. Во времена Демокрита, Сократа, Аристотеля и затем на протяжении ещё двух тысячелетий большинство учёных считали возможным только рассуждениями доказать правоту своих гипотез о строении мира и законах, управляющих миром. Но такое предположение оказалось заблуждением.

О необходимости выполнения опытов для установления истины высказывались такие учёные Средневековья, как Роджер Бэкон (около 1214—1294), Френсис Бэкон (1566—1626) в Англии, Николай Кузанский (1401—1464) в Германии, великий Леонардо да Винчи (1452—1519) в Италии.



Галилео Галилей

От общих утверждений о необходимости опоры на эксперимент при изучении природы решительные шаги к систематическим экспериментальным исследованиям природы сделал великий итальянский учёный Галилео Галилей (1564—1642). Он же обогатил физику использованием математики для количественного описания физических явлений. Поэтому Галилея называют *основателем новой физики*.

Многовековой спор о том, являются ли небесные тела идеальными телами, непохожими на Землю, или они подобны Земле, Галилей разрешил экспериментальным путём, направив изготовленный им телескоп сначала на Луну, а затем и на Солнце. На Луне он обнаружил горы и долины, подобные земным, а на диске Солнца — тёмные пятна. Тем самым стиралась грань между земным и небесным, Земля получала права одной из планет Солнечной системы.

На протяжении почти двух тысячелетий в науке господствовало мнение Аристотеля (384—322 гг. до н. э.) о том, что тяжёлые тела падают на Землю быстрее лёгких. Галилей, бросая шары, имеющие различный вес, с Пизанской башни, наглядными опытами доказал, что все тела независимо от их веса падают на Землю с одинаковым ускорением. Далее Галилей теоретически вывел, что при свободном падении тел пройденные пути должны быть пропорциональны квадрату времени движения. Этот вывод он проверил в специально поставленных опытах и доказал правоту своей теории.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Особенностями нового этапа в развитии физики, начиная с работ Галилея, стали поиски количественных закономерностей, связывающих физические величины, и проведение специальных экспериментов для установления предсказанных закономерностей.

Переход от качественного описания наблюдаемых природных явлений в таких терминах, как *большой — маленький, горячий — холодный, быстрый — медленный*, к количественному описанию физических объектов и процессов потребовал разработки специальных приборов. Галилей обосновал возможность применения маятника для изготовления часов и измерения времени, сделал прибор для измерения температуры, являющийся прообразом современного термометра.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Начиная с работ Галилея можно выделить следующие этапы в изучении природного явления. На первом этапе изучения природного явления происходит его непосредственное *наблюдение*.

Чувственный опыт, считал Галилей, привлекает наше внимание к наблюдаемому явлению, но не открывает законов природы, так как книга природы «...написана на языке математики...».

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ За чувственным опытом (наблюдением) должно следовать выдвижение аксиомы, или, по современной терминологии, *гипотезы*.

Выдвижение гипотезы является творческим процессом, в котором силой ума создаётся абстрактная упрощённая модель наблюдаемого явления, способная сделать его понятным для нас.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ За выдвижением гипотезы следует этап её математического развития. Если математическое развитие гипотезы приводит к выводу *следствий*, до сих пор неизвестных науке, и эти следствия могут быть проверены экспериментально, то такое развитие гипотезы заслуживает названия физической теории.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Если в экспериментах подтверждаются следствия, предсказанные физической теорией, то и сама теория может считаться подтверждённой *экспериментом*.

Галилей обосновал необходимость экспериментальной проверки следствий из теории тем, что «...наши рассуждения должны быть о чувственном мире, а не о бумажном мире».

Существенным препятствием для развития науки в древности и в Средние века было противостояние научных и религиозных воззрений на природу и её законы. Поскольку мир уже был объяснён до зарождения физики и астрономии на основе представлений о богах (или Боге), создавших этот мир и управляющих им, попытки объяснить природные явления без привлечения сверхъестественных сил встретили в большинстве случаев резкое противодействие сторонников прежних взглядов. Грека Анаксагора суд приговорил к смерти за то, что «...афиняне признавали солнце богом, [он] учил, что оно — огненный жернов». Заступничество его ученика Перикла спасло Анаксагора от смерти, но не от ссылки и запрещения всех сочинений. И через две тысячи лет после суда над Анаксагором спор о природе небесных светил и месте человека в этом мире не был закончен. В 1600 г. в Италии по приговору суда инквизиции был сожжён Джордано Бруно за учение о множественности обитаемых миров, так как судьи считали такую гипотезу «неправильной».

Галилео Галилей под страхом сурового наказания судом инквизиции был вынужден публично отречься от своих взглядов на устройство мира и признать заблуждениями свои замечательные астрономические открытия.

Наблюдение. Гипотеза. Следствие. Физическая теория. Эксперимент

1. С чего начиналось зарождение физики как науки? 2. Что общего в отношении математики к опыту и в отношении физики к опыту? 3. В чём различие отношения математики к опыту и отношения физики к опыту? 4. Почему Галилео Галилея называют основателем новой физики? 5. Каковы основные этапы научного изучения природного явления? 6. Можно ли только путём логических рассуждений доказать, что Солнце неподвижно, а Земля движется вокруг него? А можно ли доказать обратное? 7. Может ли быть разрешён научный спор приговором суда?

§ 2. Моделирование явлений и объектов природы

Практика и теория. Процесс познания окружающего мира имеет две стороны — практику и теорию.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ *Практика* предполагает взаимодействие человека с предметами материального мира и является основой формирования элементарных знаний об окружающем мире.
Теория — это система обобщённых знаний, которая описывает, объясняет совокупность явлений реального мира и предсказывает какие-то новые явления или свойства исследуемых объектов.

В отличие от практики теория не содержит процесса непосредственного взаимодействия человека с реальным миром. Предметом изучения теории являются абстрактные понятия, сформулированные человеком на основе практики, т. е. взаимодействия человека с реальным миром.

Понятия о предметах. Каждый человек уже в детском возрасте на опыте взаимодействия с различными предметами приобретает разные практические знания. Когда родители предупреждают ребёнка об опасности словом «горячо!» при его приближении к различным горячим предметам и он имеет возможность убедиться на собственном опыте, что эти предметы действительно горячие, то у ребёнка постепенно формируется обобщённое понятие о горячем как свойстве, которое может быть присуще любому предмету. Аналогично формируются понятия о том, что означают слова «холодный», «сладкий», «горький», «тяжёлый», «лёгкий» и другие понятия, характеризующие свойства предметов реального мира.

Понятия о предметах и явлениях природы существенно отличаются от самих предметов и явлений.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Предметы и явления *объективны*, одинаковы для всех наблюдателей, а понятия о них у людей различны, индивидуальны, *субъективны*.

Так, Солнце существует объективно и оно одинаково для всех людей, а понятие о том, что такое Солнце, у каждого человека своё особенное, субъективное. Солнце остаётся одним и тем же, смотрит ли на него ребёнок или учёный-астроном, а понятие человека о Солнце развивается, изменяется с приобретением жизненного опыта, научных знаний.

Физические модели. Для теоретического обобщения полученных знаний о материальном мире и природных явлениях используется метод моделирования.

ЗАПОМНИТЕ **Моделирование** — это процесс замены одного объекта другим, специально созданным и называемым **моделью**.

Для успешного использования модели её свойства должны быть возможно близкими к свойствам изучаемого объекта.

Модели бывают материальные и теоретические. Примером *материальной модели* может служить манекен, являющийся моделью человека. Он может быть признан хорошей моделью человека, если хорошо воспроизводит форму его тела, однако очевидно, что самый лучший манекен и даже говорящий робот совсем не то же самое, что человек. Любая модель не тождественна объекту, а лишь упрощённо воспроизводит некоторые из его свойств. Например, уменьшенную модель самолёта изготавливают для испытания его в аэродинамической трубе, модели машин — для детских игр.

В физике широко используются физические модели, относящиеся к теоретическим моделям.

ЗАПОМНИТЕ **Физические модели** — модели, в которых сложный природный объект заменяется мысленным, более простым воображаемым объектом, свойства которого близки к свойствам реального объекта.

Свойства физической модели или её составных частей задаются создателем модели такими, чтобы она обладала всеми основными известными свойствами реального объекта. Например, идеальный газ, являющийся моделью реального газа, можно представить состоящим из идеально упругих точечных атомов или молекул. Если при анализе свойств физической модели обнаруживаются новые, неизвестные ранее закономерности, то открывается возможность экспериментальной проверки соответствия физической модели реальному объекту.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ При экспериментальном подтверждении существования свойств и явлений, предсказанных на основе использования физической модели, она признаётся пригодной для дальнейшего развития физической теории.



Джеймс Клерк Максвелл

Так, на основе использования модели идеального газа английский физик Джеймс Клерк Максвелл (1831—1879) теоретически вывел закон распределения молекул идеального газа по скоростям. Экспериментальное подтверждение правильности теоретического предсказания Максвелла в опытах немецкого физика-экспериментатора Отто Штерна (1888—1969) и других учёных показало, что модель идеального газа вполне пригодна для теоретического исследования свойств газов.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Однако любая физическая модель является лишь воображаемым объектом и упрощённо представляет некоторые, но не все свойства реального объекта.

Модель идеального газа оказывается неприменимой для описания свойств реальных газов при высоких давлениях и низких температурах, когда становится неоправданным пренебрежение размерами молекул и силами притяжения между ними. Модель электрического взаимодействия электрона и про-

тона как точечных электрических зарядов по закону Кулона оказывается совершенно неприменимой, если электроны разгоняются ускорителем до таких высоких энергий, что проходят сквозь протон.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Таким образом, любая физическая модель объекта, процесса или явления лишь приблизительно отражает его свойства и имеет определённые границы применимости.

Роль математики в развитии физики.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Математическое описание или математическая модель природных процессов и явлений является одной из важнейших составных частей физической теории.

Во-первых, она даёт количественное описание развития физического процесса в прошедшем и будущем времени. Такое описание не только открывает возможность количественной проверки физической теории, но и служит основой для изобретений различных машин и приборов, для использования открытых физических законов на практике. Во-вторых, анализ математического выражения открытых физических законов часто приводит к предсказанию новых, неизвестных ранее физических явлений. Экспериментальная проверка этих предсказаний является проверкой фактически новой, изменённой или дополненной физической теории.



Майкл Фарадей

Так, например, Максвелл при разработке математического описания электромагнитных явлений, открытых экспериментально английским физиком Майклом Фарадеем (1791—1867), составил систему уравнений, которую теперь называют уравнениями Максвелла. Эти уравнения выражают связь напряжённости электрического поля $\vec{E}$ с индукцией магнитного поля $\vec{B}$. Открытое Фарадеем явление электромагнитной индукции описывается уравнением, показывающим, что любое изменение магнитного поля порождает вихревое электрическое поле. Максвелл предположил, что аналогичное уравнение может быть записано и для случая изменения электрического поля. Из такого предположения следовала возможность возникновения электромагнитных волн, способных распространяться в пространстве со скоростью света. Это теоретическое предсказание Максвелла, сделанное на основе математического развития идей Фарадея, было экспериментально подтверждено опытами немецкого физика Генриха Герца (1857—1894).

Практика. Теория. Моделирование. Физическая модель

1. В чём заключается отличие человеческих понятий о физических явлениях и природных объектах от самих явлений и объектов? 2. Что называют физической моделью? 3. Какова роль физических моделей в развитии физики? 4. Какова роль математики в развитии физики?

§ 3. Научные гипотезы

Можно было ожидать, что после разработки научного метода исследования природы и создания точных измерительных приборов все споры о том, какая гипотеза правильная, а какая ошибочная, прекратятся, так как появились объективные критерии установления истины. Однако и сегодня продолжаются дискуссии между сторонниками различных физических воззрений, которые длятся порой десятилетиями. Чем же это объясняется? Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим глубже утверждения, которые мы обсуждаем.

Что значит утверждение: установить истинность научной гипотезы? Для этого выясним сначала, что называют научной гипотезой.

Само употребление сочетания слов «научная гипотеза» как будто предполагает, что возможно существование гипотез и другого типа. Это действительно так.

ЗАПОМНИТЕ **Научной гипотезой** называют только такую гипотезу, которая объясняет все известные научные факты на основе использования мысленной абстрактной модели изучаемых объектов и явлений реального мира, не содержит внутренних логических противоречий и из анализа свойств модели выводит следствия, неизвестные ранее и допускающие экспериментальную проверку.

После проверки предсказанных следствий научная гипотеза может быть либо подтверждена, либо опровергнута результатами эксперимента. При экспериментальном подтверждении предсказанных следствий научная гипотеза получает признание как научная теория.

Таким образом,

ЗАПОМНИТЕ **научными гипотезами** называют только такие гипотезы, которые предсказывают что-то ранее неизвестное науке, и это предсказание может быть экспериментально проверено.

Научная гипотеза обязательно включает в себя возможность экспериментального подтверждения или опровержения.

Именно такими были гипотезы выдающегося английского учёного Исаака Ньютона (1643—1727) о существовании сил всемирного тяготения, Максвелла о существовании электромагнитных волн, немецкого физика Макса Планка (1858—1947) о существовании кванта действия, английского физика Эрнста Резерфорда (1871—1937) о существовании атомного ядра, выдающегося немецкого физика-теоретика Альберта Эйнштейна (1879—1955) о существовании фотона.

Рассмотрим теперь примеры других гипотез. Одной из интереснейших гипотез в истории науки является гипотеза о множественности обитаемых миров. Научная ли эта гипотеза? Безусловно, научная. Она не противоречит известным фактам и предсказывает новые. Она в принципе допускает экспериментальную проверку. Достаточно обнаружить жизнь хотя бы ещё на одной планете Солнечной системы или на планете около какой-нибудь другой



Исаак Ньютон



Эрнест Резерфорд



Альберт Эйнштейн

звезды — и гипотеза будет подтверждена. Гораздо труднее, но в принципе возможно эту гипотезу опровергнуть. Для этого нужно исследовать все планетные системы во Вселенной, и если жизнь там не будет обнаружена, то гипотеза будет опровергнута.

Широко известна гипотеза о посещении Земли пришельцами из других миров. Эта гипотеза кажется прямым продолжением гипотезы о множественности обитаемых миров, однако она едва ли заслуживает названия научной гипотезы. Для её обоснования используются либо давно известные и объяснённые наукой факты, либо утверждения о будто бы имевших место фактах, не объяснённых наукой, но эти факты не имеют научного подтверждения. Гипотеза о пришельцах не делает и предсказаний, которые можно было бы экспериментально проверить. Так что гипотеза о пришельцах скорее *фантастическая гипотеза*, чем научная.

Ещё один пример гипотезы — гипотеза о наличии у человека бессмертной души и её существовании после смерти человека в другом мире. Эта гипотеза не может быть ни подтверждена, ни опровергнута методами науки — ни физикой, ни химией, ни биологией, поскольку свойства души и потустороннего мира, согласно гипотезе, изначально недоступны научному исследованию, лежат за пределами возможностей человека этого мира. Гипотезы такого типа не относятся к числу научных гипотез в силу их непроверяемости методами науки. Непроверяемые гипотезы называют *метафизическими гипотезами*. Невозможность научного доказательства или опровержения метафизической гипотезы не лишает её права на существование. Чтобы принять или отвергнуть такую гипотезу, человек должен верить в её истинность или не верить в неё.

Научная, фантастическая, метафизическая гипотезы

1. Какие гипотезы называются научными? 2. Какие гипотезы называются метафизическими? 3. Чем отличается научная гипотеза от метафизической? 4. Приведите примеры научных гипотез.

§ 4. Физические законы

Причина и следствие. Формирование обобщённых понятий о предметах и явлениях природы и обозначение их словами являются первым шагом теоретического осмысления мира. После этого открывается возможность установления причинно-следственных связей между исследуемыми явлениями, событиями.

ЗАПОМНИТЕ Явление или процесс называется **причиной** другого явления или процесса в том случае, если первый процесс предшествует второму по времени и является обязательным условием для его возникновения. Второй процесс в этом случае является **следствием** первого процесса.

Один и тот же процесс в первом случае может быть причиной другого процесса, а во втором случае — его следствием. Например, при нагревании металлический стержень удлиняется. В этом случае нагревание стержня является причиной, а удлинение стержня — следствием нагревания. Если же к стержню приложить внешнюю силу и вызвать его растяжение, то в результате деформации растяжения произойдёт повышение температуры стержня. В этом случае растяжение стержня является причиной повышения его температуры.

Законы природы. Установив причинно-следственные связи в различных природных явлениях, человек пытается найти единое теоретическое объяснение многим явлениям, обладающим какими-то общими признаками. Например, наблюдается падение на землю снега с неба, яблока с дерева, книги со стола. Каждый случай в бытовой практике объясняется по-своему.

Почему падает снег? Потому что пришла зима и стало холодно.

Почему упало яблоко? Потому что оно созрело.

Почему упала книга со стола? Потому что её толкнули, вот она и упала.

Каждое из этих объяснений в каком-то смысле правильное, но в них не обращается внимание на существенную деталь: снег, яблоко, книга и любые другие предметы всегда и везде падают на землю, если только что-нибудь не удерживает их от падения. Когда из наблюдений выведено такое общее свойство тел, оно даёт возможность объяснения любого факта падения тел. Теоретическое осмысление явлений падения различных тел завершается формулировкой *закона природы*: все свободные тела падают на землю.

ЗАПОМНИТЕ **Законом природы** называют утверждение, выражающее существенную и устойчивую связь природных явлений.

Динамические и статистические закономерности. Закономерности, связи между различными физическими величинами, характеризующими физические процессы, бывают двух видов — *динамические* и *статистические*.

ЗАПОМНИТЕ **Динамическими закономерностями** называют такие закономерности, в которых точно известные причины позволяют получать точно известные следствия.

Примером динамической закономерности может служить результат действия известной силы $\vec{F}$ на тело известной массы m: согласно второму закону Ньютона, тело приобретёт ускорение $\vec{a}$, точно определяемое уравнением $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$.

Динамический характер имеют закономерности взаимодействия тел силами всемирного тяготения, действия электромагнитных полей на электрические заряды и многие другие процессы.

ЗАПОМНИТЕ **Статистическими закономерностями** называют такие закономерности, в которых известная причина не позволяет получить точно известное следствие, а указывает лишь его вероятность.

Статистические закономерности устанавливаются в случае взаимодействия большого числа тел или неконтролируемого и случайным образом изменяющегося во времени внешнего воздействия на одно тело. Статистический характер имеют все закономерности, описывающие процессы в микромире.

При бросании кубика с цифрами от 1 до 6 на гранях невозможно предсказать, грань с какой цифрой окажется верхней, так как на кубик действуют рука, воздух, стол и эти действия случайно изменяются при каждом броске. Однако если все грани совершенно одинаковы, то при большом числе бросков каждая грань выпадет примерно одинаковое число раз. Это статистическая закономерность.

Ещё одним примером статистической закономерности может служить связь между абсолютной температурой газа и скоростью беспорядочного теплового движения его молекул. Знание точного значения температуры газа не позволяет определить точное значение скорости одной молекулы, так как скорость молекулы газа при каждом столкновении изменяется. Однако вполне возможно определить среднее значение скорости большого числа молекул газа или найти для молекулы вероятность обладания данным значением скорости.

Научные факты. Установление закона природы всегда основывается на научных фактах.

ЗАПОМНИТЕ **Научными фактами** называют такие утверждения, которые могут быть проверены и независимо подтверждены при выполнении заданных условий любым человеком.

Например, утверждение о том, что ускорение любого тела прямо пропорционально приложенной к нему силе и обратно пропорционально массе тела, является научным фактом. Это утверждение может проверить каждый и убедиться в его правильности. А вот утверждения некоторых людей о том, что они видели летающие тарелки и беседовали с инопланетянами, до сих пор не являются научным фактом, так как эти люди не могут (или не хотят?) сообщить остальным, каким способом любой человек может убедиться в реальности существования летающих тарелок.

Физические величины. Для теоретического описания природных явлений в физике вводятся понятия, с помощью которых возможна количественная характеристика физических свойств тел и природных процессов.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ В физике для точного количественного описания физических явлений вводятся *физические величины*.

Например, для количественного выражения действия одного тела на другое вводится физическая величина, называемая *силой*. Чем отличается понятие «притяжение» от понятия «сила»? Понятие «притяжение» указывает лишь направление действия одного тела на другое, понятие «сила» даёт возможность количественной меры действия одного тела на другое. Для измерения сил изготавливаются приборы — *динамометры* и вводится единица силы — *ньютон*. Значение силы определяется по деформации пружины динамометра.

Неодинаковость силы притяжения разных тел к Земле указывает на то, что все тела обладают чем-то, от чего зависит сила их притяжения к Земле. Это что-то — это ещё одна физическая величина, названная *массой* тела. Чем больше масса тела, тем больше сила его притяжения к Земле. Выбрав одно тело за эталон и приняв его массу за единицу массы — *килограмм*, мы можем найти массу любого другого тела, сравнив силу притяжения этого тела к Земле с силой притяжения эталона к Земле. В результате закон свободного падения всех тел на Землю превращается в закон притяжения всех тел Землёй: любое тело притягивается к Земле силой, пропорциональной массе тела. Этот закон уже имеет математическое выражение

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

Что нового даёт человеку использование придуманных им абстрактных понятий «масса» и «сила»? Что даёт закон притяжения с использованием этих абстрактных понятий? Эти изобретения теории, основанные на экспериментальном изучении природы, позволяют по измеренной силе притяжения к Земле определить массу тела или по известной массе тела вычислить силу его притяжения к Земле.

Могут ли придуманные человеком абстрактные понятия играть существенную роль в процессе познания реального мира? Не только могут, но и, безусловно, играют. В любой физической теории, в любом физическом законе устанавливаются связи между физическими величинами, но не между какими-то реальными телами, предметами.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Теория оперирует лишь с абстрактной моделью реального мира. Если на основе теории удаётся правильно предсказать результаты опыта с реальными физическими объектами, то это означает, что в абстрактной физической модели реального мира были выделены существенные свойства реального мира.

Причина. Следствие. Закон природы. Динамические и статистические закономерности. Научный факт. Физическая величина

1. Как определить, что является причиной и что следствием в ряду природных явлений? 2. Что называют законом природы? 3. Какие законы природы называют динамическими? 4. Какие законы природы называют статистическими? 5. Какие факты называют научными? 6. Для чего вводятся физические величины?

§ 5. Границы применимости физических теорий и законов

Границы применимости физических теорий и законов. Физические теории и законы имеют определённые границы применимости. Границы применимости теории определяются прежде всего условием применимости физической модели, использованной при создании теории.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Экспериментально установленные законы применимы лишь в тех условиях, в которых они установлены.

Например, если в молекулярно-кинетической теории использована модель идеального газа, то выводы и законы этой теории применимы к реальным газам лишь в том случае, если свойства реального газа приближаются к свойствам идеального газа.

Закон сохранения энергии установлен экспериментально для изолированных систем, поэтому и ожидать его выполнения можно лишь в изолированных системах.

Классический закон сложения скоростей экспериментально установлен в опытах при значениях скоростей движения тел, значительно меньших скорости света. Поэтому нет оснований для уверенности в его применимости при скоростях движения, близких к скорости света. И в экспериментах действительно обнаружено, что при скоростях, близких к скорости света, действует другой закон сложения скоростей, названный *релятивистским законом сложения скоростей.*

Развитие теории. Заканчивается ли создание физической теории введением физических понятий, формулировкой физических законов и указанием границ их применимости? Конечно же нет. Существующие связи явлений природы, её законы человеку не удаётся понять сразу и до конца.

На первых порах в качестве закона выступает лишь обобщение результатов практики, созерцания явлений природы. По мере расширения области познания мира открытые ранее законы природы переосмысливаются человеком, получают новую формулировку, а явления, описываемые законом, получают более полное объяснение.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Дальнейший процесс познания мира, в том числе и на основе существующей физической теории, приводит к открытиям новых фактов, новых явлений, которые не может объяснить существующая теория. Для объяснения новых фактов выдвигаются новые гипотезы и разрабатывается новая физическая теория.

В этой новой теории физические понятия, использовавшиеся прежней теорией, могут значительно измениться. Это необходимо для того, чтобы новая теория могла объяснить не только ранее известные факты, но и все новые факты и явления.

Принцип соответствия. Как показывает история развития науки, любая научная теория спустя какое-то время после создания встречается с неразрешимыми трудностями и заменяется новой теорией. Каковы взаимоотношения между старой и новой теориями?

МОУ ИТЛ №24
БИБЛИОТЕКА

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ История развития науки показывает, что если старая физическая теория была построена на использовании достоверных научных фактов, не содержала логических ошибок и объясняла все известные ранее факты и явления, то между старой и новой теориями обычно обнаруживается такое соответствие, которое позволяет получить старую теорию из новой в качестве частного случая.

Так, из закона всемирного тяготения, применимого для любых тел во Вселенной — от элементарных частиц до галактик, — для условий на поверхности Земли можно получить как следствие более ограниченный, частный закон в виде $\vec{F} = m\vec{g}$. Такую связь между старой и новой физическими теориями выражает *принцип соответствия*.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Согласно принципу соответствия новая теория не отрицает старую теорию полностью. Новая теория содержит возможность установления преемственной связи между старой и новой теориями и в ограниченной области применения даёт те же результаты, что и старая.

Закончилось ли развитие теории гравитации открытием закона всемирного тяготения? Будет ли этот закон когда-нибудь опровергнут? До сих пор нет ясности, что является носителем сил всемирного тяготения. Предполагается, что в природе существуют элементарные частицы — гравитоны, с помощью которых осуществляется гравитационное взаимодействие. Однако экспериментально гравитоны ещё не обнаружены.

Не закончится развитие теории гравитации и после открытия гравитонов. Однако независимо от того, какой будет новая теория, в качестве частного предельного случая она даст ньютоновский закон всемирного тяготения. Таким образом, развитие науки в основном идёт не путём отмены, опровержения ранее добытых знаний, а путём их уточнения, дополнения, углубления.

Скоро ли окончится наука? Нельзя ли найти надёжные критерии истинности научных теорий, для того чтобы быстрее обнаружить имеющиеся недостатки в существующих теориях и построить истинную научную теорию, не имеющую никаких расхождений с действительностью? Ньютон, создатель теории всемирного тяготения, один из величайших учёных всех времён, писал: «Не знаю, каким я кажусь людям, но я себе представляюсь ребёнком, который играет на берегу моря и радуется, когда ему удаётся отыскать гладкий камушек или красивую раковину не совсем обыкновенного вида, в то время как неизмеримый океан истин лежит передо мною неисследованным». Убеждение Ньютона о существовании неизмеримого океана истин, ещё не открытых человеком, разделяют и большинство современных учёных, исследующих природу.

Границы применимости теорий. Принцип соответствия

1. Почему физические законы и теории имеют определённые границы применимости? 2. Почему происходит замена одних физических теорий другими? 3. Каково соответствие между старой и новой физическими теориями?

§ 6. Физическая картина мира

Предположения о возможности исчерпания науки о природе могут показаться естественными, если не понимать существенного различия между физической картиной мира и реальным миром.

ЗАПОМНИТЕ **Физической картиной мира** называют систему представлений о природе, основанную на наиболее общих и универсальных законах физики.

В XVII—XVIII вв. в науке господствовала *механическая картина мира*. В этот период казалось возможным все явления в природе объяснить на основе открытых законов механики. После открытия и изучения в XIX в. законов электрического и магнитного взаимодействия механическая картина мира оказалась несостоятельной. Успехи в изучении электрических и магнитных явлений открыли возможность построения *электромагнитной физической картины мира*.

ЗАПОМНИТЕ **Электромагнитная картина мира** — это та картина, в которой все явления и законы природы получили объяснение на основе применения законов электрического и магнитного взаимодействия.

XX век стал эпохой открытий строения атома и атомного ядра, открытия и изучения свойств элементарных частиц. Для объяснения свойств атомов и элементарных частиц оказалось недостаточно механики и электродинамики.

ЗАПОМНИТЕ **Современная физическая картина мира** основана на представлениях об универсальности законов квантовой физики, способной объяснить все явления в природе — от превращений элементарных частиц до вспышек сверхновых звёзд и расширения Вселенной.

Если считать тождественными физическую картину мира и реальный мир, природу, то необходимо признать, что физика как наука обязательно придёт к концу своего развития. Так в своё время фактически завершилось развитие механики и электродинамики.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Но нельзя забывать о том, что любая физическая теория имеет объектом изучения не сам реальный мир, а лишь его упрощённую модель. Эта модель — изобретение человеческого ума, а не сам объективный мир.

Есть все основания быть уверенными, что реальный мир сложнее, многостороннее, многообразнее любой созданной до сих пор физической модели. Поэтому завершение развития какой-то физической теории или физической картины мира вовсе не является доказательством полного познания природы. Оно означает лишь исчерпание возможностей упрощённой физической модели, лежащей в основе теории.

Изобретение микроскопа, телескопа, рентгеновской трубки, электронного осциллографа, радиоприёмника, камеры Вильсона, счётчика Гейгера и многих других приборов позволило открыть тысячи и тысячи новых физических явлений. Эти открытия показывают, что природа значительно богаче, многооб-

разнее, чем она представляется человеку, вооружённому лишь собственными органами чувств. И сегодня нет никаких оснований для предположений о том, что природа уже исчерпала все свои секреты и наука приблизилась к границам познания.

Практика как критерий истины. Истинность добытых наукой знаний в каждый исторический период контролируется не только логическими доказательствами и специально поставленными опытами.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Решающим критерием истинности научных знаний является человеческая практика.

Физик, исследующий явление природы, обычно не ставит перед собой задач практического применения исследуемого явления. Его интересует прежде всего вопрос, как и почему происходит это явление. Например, Майкл Фарадей, открывший явление электромагнитной индукции, на вопрос министра финансов, посетившего его лабораторию, о том, какое практическое приложение найдёт это открытие, не смог дать даже предположительного ответа. Однако он выразил уверенность, что приложение будет найдено и министерство финансов обложит его налогом. И это предположение полностью подтвердилось, так как все электрогенераторы и электромоторы, электрическое освещение, радио, телефон, телевидение, компьютеры были бы невозможны без открытия этого явления.

Резерфорд, открывший атомное ядро и предсказавший осуществление ядерных реакций, не верил в возможность практического применения ядерной энергии. Однако вслед за учёными-исследователями идут инженеры-изобретатели, которых интересует не столько само физическое явление, сколько возможности его практического использования. Изобретённые и изготовленные на основе научного открытия приборы и машины работают и тем самым подтверждают истинность научного открытия.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Любое дальнейшее развитие науки не отменяет открытые ранее законы, не обесценивает уже добытые знания, а углубляет и обогащает их.

И через сто, и через тысячу лет планеты, кометы и космические корабли будут двигаться точно по таким же траекториям, по каким они движутся сегодня. Как и сегодня, силу тока в электрической цепи можно будет рассчитать на основании закона Ома. Другое дело, что будут созданы другие двигатели для космических ракет и иные источники тока. Могут быть открыты новые физические явления и законы природы, неизвестные ранее, но это не отменит известных сегодня законов, не обесценит добытых ранее знаний.

Механическая, электромагнитная и современная физическая картины мира

1. Что называют физической картиной мира? 2. Каковы были основные положения механической картины мира? 3. Каковы были основные положения электромагнитной картины мира? 4. Какова современная физическая картина мира?

Раздел I МЕХАНИКА

Глава 1 Основные понятия и законы механики

§ 7. Основные понятия и уравнения кинематики

Повторите: виды движения, характеристики движения.
Посмотрите фильм BBC «Эти загадочные животные. Причудливые способы передвижения». Обратите внимание на разнообразные способы движения, опишите в тетради особенности того или иного способа движения. Подумайте, чем они обусловлены.

ЗАПОМНИТЕ **Механическим движением** тела называется изменение его положения в пространстве относительно других тел с течением времени.

Основной задачей механики является определение положения тел и их скоростей в любой момент времени.

ЗАПОМНИТЕ Раздел механики, в котором движение тел рассматривается без выяснения причин этого движения, называется **кинематикой**.

Для определения положения тела в любой момент времени необходимо выбрать *систему отсчёта*, в которой рассматривается движение этого тела.

ЗАПОМНИТЕ Под **системой отсчёта** понимают *тело отсчёта*, которое условно считается неподвижным, *систему координат*, связанную с телом отсчёта, и *часы*, также связанные с телом отсчёта.

В кинематике система отсчёта выбирается в соответствии с конкретными условиями задачи. Например, при запуске автоматической межпланетной станции на Венеру её начальные координаты и начальная скорость определяются относительно места старта на космодроме на поверхности Земли. При выведении станции на орбиту искусственного спутника Земли целесообразно пользоваться геоцентрической системой отсчёта с началом координат в центре Земли. На траектории полёта станции к Венере необходимо воспользоваться гелиоцентрической системой отсчёта с началом координат в центре Солнца. При посадке же станции на поверхность Венеры важно знать скорость и координаты станции относительно поверхности планеты, поэтому целесообразно систему отсчёта связать с этой планетой.

ЗАПОМНИТЕ Линия, по которой движется некоторая точка тела, называется **траекторией** движения этой точки.

Длина участка траектории, пройденного точкой при её движении, называется **пройденным путём**.

Вектор, соединяющий начальную и конечную точки траектории, называется **перемещением**.

Движение тела, при котором отрезок, соединяющий две любые точки тела, переносится в процессе движения параллельно самому себе, называется **поступательным движением**.

При поступательном движении все точки тела перемещаются одинаково, и для описания движения всего тела достаточно выяснить зависимость координат от времени для произвольно выбранной точки тела.

ЗАПОМНИТЕ Тело, размерами которого в условиях поставленной задачи можно пренебречь, называют **материальной точкой**.

Возможность не учитывать размеры тела при механическом движении определяется не размерами самого тела, а конкретными условиями рассматриваемого движения. Одно и то же тело в одних условиях можно рассматривать как материальную точку, а в других такое упрощение недопустимо.

Например, космический корабль при описании его движения по орбите наблюдателем с поверхности Земли можно принять за материальную точку, так как размеры корабля здесь роли не играют. Однако космонавт, находящийся внутри космического корабля, не может считать его материальной точкой. Не может рассматривать космический корабль как материальную точку и другой космонавт, находящийся на космической станции, к которой приближается этот корабль. Они должны учитывать как ориентацию космического корабля в пространстве, так и его вращение.

Для определения координат тел в любой системе отсчёта необходимо уметь измерять расстояние между двумя точками.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Проведение измерений любой физической величины заключается в сравнении измеряемой величины с эталоном, условно принятым за единицу данной физической величины.

В Международной системе единиц (система интернациональная — СИ) за единицу длины принят метр (от древнегреческого слова «метрон», что означает «мера»).

ИНТЕРЕСНО Первоначально (с 1799 г.) метр определялся как одна сорокамиллионная часть земного меридиана, проходящего через Париж. В 1872 г. на Международной конференции мер было принято считать метром длину специально изготовленного эталона длины, хранящегося в Севре, близ Парижа. В 1983 г. по международному соглашению принято новое определение метра: метр равен длине пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени 1/299 792 458 секунды. Новое определение метра позволяет повысить точность измерений расстояний в специальных исследованиях.

Зависимость координат тела от времени исследуется на основе измерений времени. Для измерения времени применяются различные природные, периодически повторяющиеся процессы.

Естественной мерой времени служат сутки — период вращения Земли вокруг своей оси.

ИНТЕРЕСНО Однако вращение Земли вокруг своей оси нельзя считать идеально равномерным. Из-за тормозящего действия приливов в Океане и в земной мантии продолжительность суток увеличивается примерно на 0,001 с за столетие. На скорость вращения Земли оказывают влияние направление ветров и океанических течений, изменение распределения вещества внутри Земли, происходящее при землетрясениях. Значительно более устойчивыми и воспроизводимыми являются процессы, связанные с излучением энергии атомами. Поэтому в Международной системе (СИ) единица времени — секунда — определяется следующим образом: 1 с равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

При *координатном способе* задания положения тела в декартовой системе координат движение материальной точки определяется тремя функциями, выражающими зависимость координат от времени (рис. 1.1):

$$x = x(t),\ y = y(t) \text{ и } z = z(t).$$

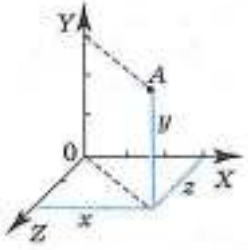


Рис. 1.1

ЗАПОМНИТЕ Зависимость координат от времени называется **законом движения** (или **уравнением движения**).

Скорость. Для количественной характеристики процесса движения тела вводится понятие скорости движения.

ЗАПОМНИТЕ **Мгновенной скоростью** $\vec{v}$ поступательного движения материальной точки в момент времени t называется предел отношения малого перемещения $\Delta\vec{s}$ к малому промежутку времени Δt, за который произошло это перемещение, при условии $\Delta t \to 0$:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}. \qquad (7.1)$$

Такой предел называется *производной перемещения по времени*. Проекция скорости на ось прямоугольной декартовой системы координат равна производной координаты по времени. Например:

$$v_x = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} = x'.$$

Мгновенная скорость — векторная величина.

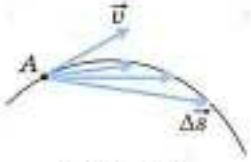


Рис. 1.2

При последовательном уменьшении длительности промежутка времени Δt направление вектора перемещения $\Delta\vec{s}$ приближается к касательной в точке A траектории движения, через которую проходит материальная точка в момент времени t (рис. 1.2).

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Вектор $\vec{v}$ скорости лежит на касательной к траектории движения материальной точки в точке A и направлен в сторону движения материальной точки.

Физический смысл выбора направления вектора скорости тела по касательной к траектории движения заключается в следующем.

Как показывает опыт, при таком выборе вектор скорости указывает направление, в котором будет двигаться материальная точка из точки A траектории, если в момент прохождения этой точки действие любых других тел на неё прекратится.

Формула (7.1) позволяет установить единицу скорости. В Международной системе (СИ) единицей расстояния является метр, единицей времени — секунда, поэтому единица скорости в СИ — метр в секунду (1 м/с). Скорость один метр в секунду равна скорости равномерно и прямолинейно движущейся точки, при которой точка за время, равное 1 с, перемещается на расстояние, равное 1 м.

ЗАПОМНИТЕ **Равномерным прямолинейным движением** называется движение с постоянной по модулю и направлению скоростью.

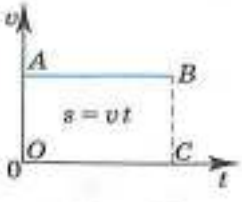


Рис. 1.3

При равномерном прямолинейном движении тело движется по прямой и за любые равные промежутки времени проходит одинаковые пути. График зависимости модуля скорости v от времени t является прямой, параллельной оси абсцисс (рис. 1.3). Путь s, пройденный телом за время t при равномерном движении со скоростью v, определяется уравнением

$$s = vt.$$

Если площадь прямоугольника $OABC$ на графике зависимости скорости v от времени t выразить в единицах произведения скорости v на время t, то она равна пройденному пути s:

$$OA \cdot OC = vt.$$

Движение любого тела в реальных условиях никогда не бывает строго равномерным и прямолинейным.

ЗАПОМНИТЕ Движение, при котором тело за равные промежутки времени совершает неодинаковые перемещения, называют **неравномерным движением.**

Ускорение. При неравномерном поступательном движении скорость тела изменяется с течением времени. Процесс изменения скорости тела характеризуется *ускорением*.

ЗАПОМНИТЕ

Ускорением называется векторная величина $\vec{a}$, равная пределу отношения малого изменения вектора скорости $\Delta\vec{v}$ к малому промежутку времени Δt, за которое произошло это изменение, при условии $\Delta t \to 0$:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

Этот предел называется *производной скорости по времени*. Проекция ускорения на координатную ось является первой производной проекции скорости на эту ось или второй производной координаты по времени. Например:

$$a_x = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = x''.$$

Направление вектора $\vec{a}$ ускорения совпадает с направлением вектора $\Delta\vec{v}$ изменения скорости при очень малых значениях изменения времени $\Delta t \to 0$. Вектор ускорения $\vec{a}$ при криволинейном движении тела может быть направлен по отношению к вектору $\vec{v}$ скорости под любым углом α в пределах $0 \leqslant \alpha \leqslant \pi$. Его можно представить в виде суммы двух составляющих: тангенциальной и нормальной. *Тангенциальное* ускорение $\vec{a}_\tau$ направлено по касательной к траектории, *нормальное* ускорение $\vec{a}_n$ — по нормали к касательной (рис. 1.4). Из рисунка следует, что модуль a полного ускорения равен:

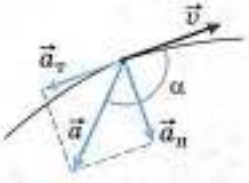


Рис. 1.4

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}.$$

Равноускоренное движение.

ЗАПОМНИТЕ

Равноускоренным движением называется движение с постоянным по модулю и направлению ускорением.

При равноускоренном прямолинейном движении ускорение движущегося тела равно отношению изменения вектора скорости $\Delta\vec{v}$ к интервалу времени Δt, причём интервал времени может быть любым, а не только очень малым:

$$\boxed{\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.}$$

Если в начальный момент времени $t = 0$ скорость тела равна $\vec{v}_0$, а в момент времени t равна $\vec{v}$, то $\Delta\vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0$, $\Delta t = t$,

$$\boxed{\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t.}$$

При равноускоренном прямолинейном движении векторы $\vec{v}$ и $\vec{a}$ могут быть сонаправлены или направлены противоположно. При сонаправленных

векторах $\vec{v}$ и $\vec{a}$ модуль скорости v в любой момент времени вычисляется по формуле

$$v = v_0 + at. \quad (7.2)$$

При противоположном направлении векторов $\vec{v}$ и $\vec{a}$ модуль скорости v равноускоренного прямолинейного движения вычисляется по формуле

$$v = v_0 - at. \quad (7.3)$$

В формулах (7.2) и (7.3) буквой a обозначен модуль ускорения. Если начальная скорость v_0 равна нулю, то скорость равноускоренного прямолинейного движения определяется формулой

$$v = at. \quad (7.4)$$

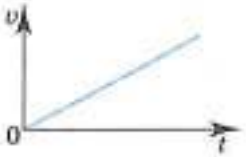


Рис. 1.5

График зависимости модуля скорости v равноускоренного прямолинейного движения от времени t при $v_0 = 0$ представлен на рисунке 1.5.

Примерно равноускоренным движением является падение тел на Землю с небольшой высоты в тех случаях, когда сопротивление воздуха пренебрежимо мало.

ЗАПОМНИТЕ Падение в пустоте называют **свободным падением**.

Все тела при свободном падении в данном месте движутся с одинаковым ускорением.

ЗАПОМНИТЕ Ускорение, с которым падают на Землю тела в пустоте, называют **ускорением свободного падения**.

Модуль ускорения свободного падения обозначается буквой g.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ В различных местах около поверхности земного шара ускорение свободного падения примерно одинаково и равно:

$$g \approx 9{,}8 \text{ м/с}^2.$$

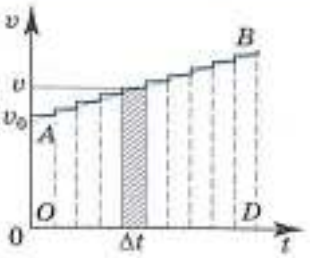


Рис. 1.6

При равноускоренном прямолинейном движении с начальной скоростью $\vec{v}_0$, сонаправленной с вектором ускорения $\vec{a}$, графиком зависимости модуля скорости v от времени t является прямая AB (рис. 1.6).

Заменим приближённо равноускоренное прямолинейное движение последовательностью равномерных прямолинейных движений, как это представлено на рисунке 1.6. Путь, пройденный за каждый интервал времени Δt при равномерном движении, численно равен площади соответствующего прямоугольника на графике зависимости скорости от времени. Сумма площадей всех прямоугольников на графике равна площади трапеции $OABD$. Следовательно, в единицах произведения vt площадь под графиком скорости равноускоренного движения равна пройденному пути. Площадь трапеции

$OABD$ равна сумме площадей прямоугольника $OACD$ и треугольника ABC (рис. 1.7). Поэтому путь s, пройденный телом за время t, определяется уравнением

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t t = v_0 t + \frac{at^2}{2}. \qquad (7.5)$$

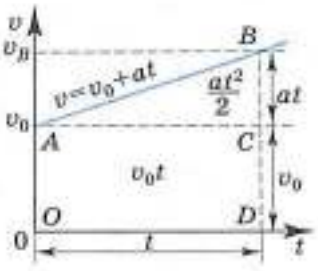


Рис. 1.7

Если векторы скорости $\vec{v}$ и ускорения $\vec{a}$ направлены противоположно, то аналогичным способом можно получить, что пройденный за время t путь s равен $s = v_0 t - \frac{at^2}{2}$.

Если $v_0 = 0$, из формулы (7.5) следует:

$$s = \frac{at^2}{2}. \qquad (7.6)$$

Из формул (7.4) и (7.6) следует:

$$s = \frac{v^2}{2a},\ v = \sqrt{2as},\ a = \frac{v^2}{2s},\ a = \frac{2s}{t^2},\ t = \sqrt{\frac{2s}{a}}.$$

Равномерное движение по окружности. В природе и технике часто наблюдается движение тел по окружности с постоянной по модулю скоростью. Примерно так движутся Луна вокруг Земли и Земля вокруг Солнца. При равномерном движении материальной точки по окружности вектор скорости $\vec{v}$ изменяется по направлению, но остаётся постоянным по модулю.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Поскольку направление вектора скорости изменяется со временем, равномерное движение по окружности является *ускоренным движением*.

Если модуль вектора скорости $\vec{v}$ при движении по окружности не изменяется со временем, то тангенциальное ускорение равно нулю, в любой момент времени вектор ускорения перпендикулярен вектору скорости и является нормальным ускорением: $\vec{a} = \vec{a}_n$.

ЗАПОМНИТЕ Так как вектор ускорения при равномерном движении по окружности в любой момент времени t направлен к центру окружности, его называют **центростремительным ускорением** (рис. 1.8).

Для определения модуля вектора центростремительного ускорения при равномерном движении по окружности найдём отношение модуля изменения вектора скорости к малому интервалу времени Δt, за который произошло это изменение (рис. 1.9). Так как интервал времени Δt очень мал, то угол α между векторами скорости $\vec{v}_A$ и $\vec{v}_B$ в точках A и B окружности тоже очень мал. Поэтому

$$\Delta v = v\alpha. \qquad (7.7)$$

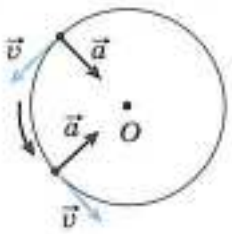


Рис. 1.8

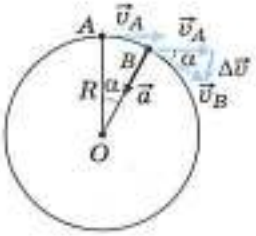


Рис. 1.9

Угол α между векторами скорости в точках A и B равен углу α между радиусами, соединяющими данные точки с центром окружности. Этот угол равен отношению длины дуги AB к радиусу окружности. Длина дуги AB равна $v\Delta t$, следовательно,

$$\alpha = \frac{v\Delta t}{R}. \qquad (7.8)$$

Используя выражения (7.7) и (7.8), получаем, что модуль центростремительного ускорения a при равномерном движении по окружности равен:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v\alpha}{\Delta t} = \frac{vv\Delta t}{R\Delta t} = \frac{v^2}{R}. \qquad (7.9)$$

Модуль вектора центростремительного ускорения $\vec{a}$ при равномерном движении тела по окружности не изменяется, но его направление постоянно изменяется. Поэтому равномерное движение по окружности не является движением с постоянным ускорением, т. е. не является равноускоренным движением.

ЗАПОМНИТЕ Интервал времени, за который тело совершает один оборот по окружности, называется **периодом обращения** и обозначается буквой T.

При равномерном движении по окружности радиусом R со скоростью v период обращения T можно определить, разделив длину окружности на скорость v:

$$T = \frac{2\pi R}{v}. \qquad (7.10)$$

Величина, обратная периоду T, называется *частотой обращения* и обозначается буквой ν:

$$\nu = \frac{1}{T}. \qquad (7.11)$$

Из формул (7.9)—(7.11) следует:

$$a = \frac{4\pi^2 R}{T^2}, \quad a = 4\pi^2 R\nu^2.$$

Равномерное движение материальной точки по окружности можно характеризовать *угловой скоростью*. Угловая скорость — векторная величина, но далее мы будем рассматривать только её модуль.

ЗАПОМНИТЕ **Угловой скоростью** ω равномерного движения точки по окружности радиусом R называется отношение угла $\Delta\varphi$ поворота радиуса, соединяющего материальную точку с центром окружности, к интервалу времени Δt, за который произошёл этот поворот:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}.$$

Угол поворота $\Delta\varphi$ измеряется в радианах, поэтому единица угловой скорости в СИ — радиан в секунду.

Выразив длину s дуги окружности через радиус R окружности и центральный угол $\Delta\varphi$, можно установить связь между угловой ω и линейной v скоростями движения материальной точки по окружности и центростремительным ускорением:

$$s = R\Delta\varphi, \quad v = \frac{s}{\Delta t} = \frac{R\Delta\varphi}{\Delta t} = R\omega, \quad a = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R.$$

Угловая скорость ω связана с частотой ν и периодом T вращения выражением

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}.$$

Виды движения. Траектория. Путь. Перемещение. Скорость. Ускорение. Система отсчёта. Равноускоренное движение

1. Что изучает механика? 2. Что изучает кинематика? 3. Что называют системой отсчёта? 4. Какое движение называют поступательным? 5. При каких условиях тело можно считать материальной точкой? 6. Как определяются единицы длины и времени? 7. Каков физический смысл мгновенной скорости и мгновенного ускорения? 8. Какова связь между тангенциальным, нормальным и полным ускорением?

ЗАДАЧА 1. Камень брошен с высоты h над поверхностью Земли с начальной скоростью $\vec{v}_0$ под углом α к горизонту. Определите зависимость координат тела от времени, время движения, дальность полёта камня и максимальную высоту его подъёма над поверхностью Земли. Напишите уравнение траектории. Сопротивление воздуха не учитывайте.

Решение. В качестве тела отсчёта выберем Землю. Начало системы координат поместим в точку O, находящуюся на Земле. Ось OY направим вертикально вверх, а ось OX расположим так, чтобы вектор скорости $\vec{v}_0$ лежал в плоскости XOY (рис. 1.10). В этом случае движение будет происходить в указанной плоскости и для определения положения тела достаточно знать только две координаты — x и y. У поверхности Земли все тела движутся с постоянным ускорением $\vec{g}$, направленным вертикально вниз. Поэтому проекции ускорения камня во время всего его движения равны: $a_x = 0$; $a_y = -g$. За начало отсчёта времени выберем момент бросания камня. Запишем начальные условия: $x_0 = 0$, $y_0 = h$, $v_{0x} = v_0\cos\alpha$, $v_{0y} = v_0\sin\alpha$.

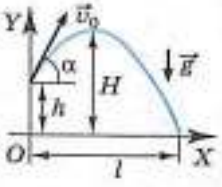


Рис. 1.10

Проекции скорости на оси координат и координаты камня в любой момент времени определяются из уравнений равноускоренного движения:

$$v_x = v_0\cos\alpha, \quad (1) \qquad x = v_0 t\cos\alpha, \quad (3)$$

$$v_y = v_0\sin\alpha - gt, \quad (2) \qquad y = h + v_0 t\sin\alpha - \frac{gt^2}{2}. \quad (4)$$

Найдём связь времени t с координатой x из уравнения (3) $\left(t = \frac{x}{v_0\cos\alpha}\right)$ и, подставив данное выражение в уравнение (4), получим

$$y = h + x\operatorname{tg}\alpha - \frac{gx^2}{2v_0^2\cos^2\alpha}. \quad (5)$$

Выражение (5) является уравнением параболы. При заданном значении угла α — это парабола типа $y = ax^2 + bx + c$.

Время подъёма камня определим, приравняв к нулю проекцию скорости v_y в уравнении (2):

$$0 = v_0\sin\alpha - gt_{под},\quad t_{под} = \frac{v_0\sin\alpha}{g}.$$

Подставив полученное значение времени подъёма камня в уравнение (4), найдём максимальную высоту подъёма:

$$H = y_{max} = h + v_0\sin\alpha\frac{v_0\sin\alpha}{g} - \frac{g}{2}\left(\frac{v_0\sin\alpha}{g}\right)^2 = h + \frac{v_0^2\sin^2\alpha}{g} - \frac{v_0^2\sin^2\alpha}{2g} = h + \frac{v_0^2\sin^2\alpha}{2g}.$$

Время движения $t_{дв}$ определим, приравняв к нулю координату y в уравнении (4): $0 = h + v_0t_{дв}\sin\alpha - \frac{gt_{дв}^2}{2}$.

Решив это уравнение относительно $t_{дв}$, получим

$$t_{дв} = \frac{v_0\sin\alpha + \sqrt{v_0^2\sin^2\alpha + 2gh}}{g}.$$

Второй корень уравнения даёт для времени движения отрицательное значение, что в данной задаче не имеет физического смысла.

Дальность полёта l камня определим из уравнения (3) при подстановке $t = t_{дв}$:

$$l = x_{max} = v_0t_{дв}\cos\alpha = \frac{v_0^2\sin\alpha\cos\alpha + v_0\cos\alpha\sqrt{v_0^2\sin^2\alpha + 2gh}}{g}.$$

При $h = 0$ получаем более простые уравнения:

$$x = v_0t\cos\alpha,\quad y = v_0t\sin\alpha - \frac{gt^2}{2},\quad t_{дв} = \frac{2v_0\sin\alpha}{g},\quad l = \frac{v_0^2}{g}\sin 2\alpha,$$

$$H = \frac{v_0^2\sin^2\alpha}{2g},\quad y = x\operatorname{tg}\alpha - \frac{gx^2}{2v_0^2\cos^2\alpha}.$$

ЗАДАЧА 2. Камень брошен вертикально вверх с поверхности Земли с начальной скоростью 30 м/с. Начертите графики зависимости от времени скорости, ускорения, координаты камня и пройденного им пути за 8 с. Считайте, что после падения камень не движется. Ускорение свободного падения примите равным 10 м/с. Сопротивление воздуха не учитывайте.

Решение. Когда говорят о графиках зависимости векторной величины от времени, например скорости или ускорения тела, то имеют в виду либо зависимость от времени проекции вектора на одну из координатных осей, либо зависимость от времени модуля вектора. Необходимо обратить внимание на то, что модуль любого вектора всегда величина положительная, а проекцию вектора на координатную ось можно принять положительной при направлении от начала координат и отрицательной при противоположном направлении. При решении задачи за положительное направление оси OX выберем направление вектора начальной скорости $\vec{v}_0$ камня. В этом случае проекция a_x

вектора ускорения свободного падения на ось OX равна $a_x = -g = -10$ м/с^2, а модуль ускорения равен $a = g = 10$ м/с^2.

Во время полёта ни направление, ни модуль вектора ускорения свободного падения не изменяются, поэтому графики $a(t)$ и $a_x(t)$ до момента достижения земной поверхности являются прямыми, параллельными оси времени.

Зависимость проекции скорости на ось OX от времени можно представить в виде

$$\upsilon_x = \upsilon_0 - gt.$$

Так как полученная функция линейная, графиком этой функции является прямая. Её можно построить по любым двум точкам. Выберем точку старта $t = 0$, $\upsilon_x = \upsilon_0$ и верхнюю точку траектории $\upsilon_x = 0$, $t_{под} = \upsilon_0/g$. Отсюда время подъёма камня до верхней точки равно $t_{под} = 30/10$ с $= 3$ с.

Зависимость координаты x камня от времени при его движении запишем в виде

$$x = x_0 + \upsilon_0 t - gt^2/2.$$

Приняв за начало отсчёта положение камня на Земле ($x_0 = 0$), получим

$$x = \upsilon_0 t - gt^2/2. \qquad (1)$$

В момент падения камня на Землю $x = 0$:

$$0 = \upsilon_0 t_{дв} - gt_{дв}^2/2.$$

Следовательно, общее время полёта

$$t_{дв} = 2\upsilon_0/g, \; t_{дв} = 6 \text{ с}.$$

Итак, мы выяснили, что общее время полёта камня равно 6 с, а время подъёма равно времени падения. В течение седьмой и восьмой секунд камень будет лежать на поверхности Земли. Построенные по этим результатам графики зависимости проекции ускорения a_x и модуля ускорения a от времени представлены на рисунке 1.11, *а*, *б*, графики зависимости проекции скорости υ_x и модуля скорости υ от времени представлены на рисунке 1.12, *а*, *б*.

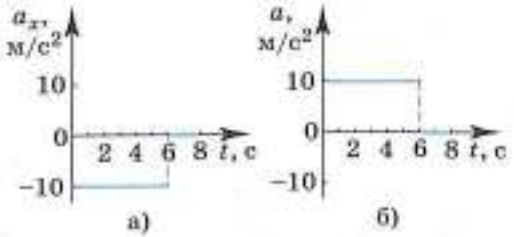


Рис. 1.11

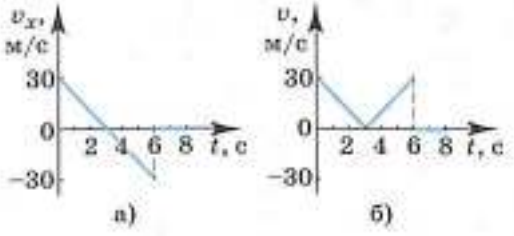


Рис. 1.12

Выражение (1) является квадратичной функцией, следовательно, графиком этой функции является парабола. Вершину параболы можно найти, подставив в выражение (1) время подъёма камня $t_{под} = \upsilon_0/g$:

$$x_{max} = \upsilon_0^2/2g; \quad x_{max} = 45 \text{ м}.$$

Для построения параболы заполним таблицу.

t, с	0	1	2	3	4	5	6	7	8
x, м	0	25	40	45	40	25	0	0	0

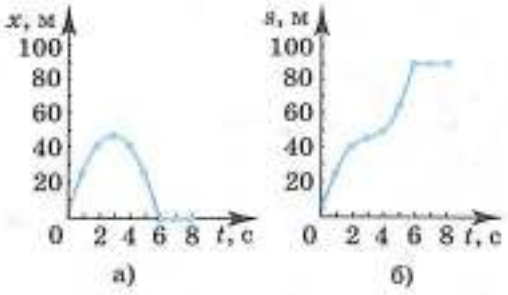


Рис. 1.13

График зависимости координаты x от времени представлен на рисунке 1.13, *а*. Для построения графика зависимости пройденного пути s от времени следует учесть, что в первые три секунды он совпадает с графиком $x(t)$, а с четвёртой по шестую секунду длина пути продолжает увеличиваться по закону:

$$s = \frac{v_0^2}{2g} + \frac{g(t_{под} - 3)^2}{2}.$$

Заполним таблицу зависимости пути от времени.

t, с	0	1	2	3	4	5	6	7	8
s, м	0	25	40	45	50	65	90	90	90

График этой зависимости представлен на рисунке 1.13, *б*.

РЕШИТЕ

7.1. На рисунке 1.14 представлены графики зависимости скорости движения двух автомобилей от времени. Автомобили движутся по одной прямой в одном направлении и в начальный момент времени находились в одном и том же месте. Через сколько времени второй автомобиль догонит первый?

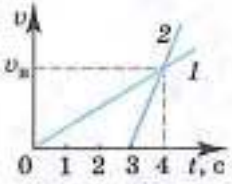


Рис. 1.14

7.2. Найдите зависимость центростремительного ускорения точек земной поверхности от широты местности. Рассчитайте центростремительное ускорение для полюса, экватора и Москвы. При расчётах примите, что Земля имеет форму шара радиусом 6400 км.

7.3. Самолёт выполняет «мёртвую петлю» в вертикальной плоскости, двигаясь с постоянной по модулю скоростью. Определите минимальную скорость движения самолёта при радиусе «петли» 90 м и максимальный радиус «петли» при скорости движения самолёта 100 м/с.

7.4. Мимо поста ГИБДД проехал автомобиль со скоростью u, превышающей дозволенную. Инспектор ГИБДД на мотоцикле отправился вдогонку в тот момент, когда автомобиль поравнялся с постом ГИБДД. Считая движение мотоцикла равноускоренным, определите скорость v мотоцикла в тот момент, когда он догонит автомобиль.

7.5. Велосипедист едет по закруглению велотрека радиусом $R = 35$ м. При движении с постоянным по модулю тангенциальным ускорением его скорость за 10 с увеличивается с 10 до 15 м/с. Определите тангенциальное, центростремительное и полное ускорения велосипедиста в конце 10-й секунды разгона.

7.6. Камень бросили под углом 60° к горизонту со скоростью 10 м/с. Рассчитайте радиус окружности, приближённо совпадающей с верхним участком траектории.

7.7. В последнюю секунду свободного падения тело прошло четвёртую часть пути. Сколько времени и с какой высоты оно падало?

7.8. Колесо радиусом 1 м катится без проскальзывания по горизонтальной поверхности со скоростью 1 м/с. Определите зависимость координат точки, находящейся на ободе колеса, от времени. Начертите траекторию движения этой точки.

1. Вы едете в автобусе или поезде метро. Что вы ощущаете в момент отправления от станции? при приближении к станции? Были ли в процессе поездки участки равномерного движения?

2. Понаблюдайте за движущимся колесом автомобиля. Объясните, для чего делаются брызговики. Для чего на автомобилях устанавливают знак «Ш» (шипы)?

1. Прибор для измерения скорости. Принцип его действия.
2. Прибор для измерения ускорения. Принцип его действия.
3. Прибор, которым пользуются картографы для измерения длины пути.



Изготовьте приспособление, позволяющее моделировать траектории тел, движущихся под различными углами к горизонту. Для этого возьмите линейку из дерева или пластмассы (длиной не менее 30 см) и просверлите в ней одинаковые отверстия с шагом 2 см (шаг пропорционален времени движения t). В получившиеся отверстия вставьте нити длиной, пропорциональной квадрату времени t^2. Для того чтобы нити были прямыми, на их концы подвесьте шарики (см. рис.). Это устройство поможет вам исследовать траектории тел, летящих под различными углами к горизонту.

Закрепите в штативе планку с шариками, например, под углом 45°. Положения шариков фактически покажут места, в которых тело окажется через равные промежутки времени в процессе полёта.

По положению шарика, размещённого в самой высокой точке, можно узнать максимальную высоту подъёма тела. Изменив наклон устройства, можно установить угол, при котором тело дальше всего переместится по горизонтали.

§ 8. Инвариантные и относительные величины в кинематике

Повторите: кинематические характеристики, система отсчёта, циклоида (из курса математики).

В практике движение одного и того же тела рассматривают в разных системах отсчёта, при этом кинематические характеристики движения при переходе из одной системы отсчёта в другую могут изменяться или оставаться одинаковыми.

ЗАПОМНИТЕ Характеристики, имеющие одинаковые значения в разных системах отсчёта, называют **инвариантными**.

К инвариантным величинам относятся промежуток времени, длина отрезка, стержня и т. п. Вывод об инвариантности этих величин сделан на основе обобщения опыта. В своей непосредственной практике человек чаще всего встречается с движением тел, скорости которых много меньше скорости света, поэтому вывод об инвариантности промежутков времени и отрезков в различных системах отсчёта экспериментально проверен лишь для таких скоростей.

ЗАПОМНИТЕ Величины, зависящие от выбора системы отсчёта, в которой производится их измерение, называют **относительными**.

Относительными величинами в кинематике являются координаты, перемещение, скорость, а иногда и ускорение. Относительна и траектория движущейся материальной точки. С изменением вида траектории при переходе из одной системы отсчёта в другую мы встречаемся в ряде задач. Астрономы, например, хорошо знают, что такие планеты, как Марс, Сатурн, Юпитер, «выписывают» на небе сложные траектории с петлями. Между тем траектории их движения относительно Солнца — эллипсы. Всё дело, оказывается, в том, что мы наблюдаем эти планеты в системе отсчёта, связанной с Землёй, которая сама движется по эллипсу относительно Солнца.

Относительность вида траектории можно продемонстрировать и в лаборатории. Отметим на ободе колеса тележки точку и будем наблюдать за её перемещением при движении тележки. Ясно, что в системе отсчёта, связанной с тележкой, траекторией точки будет окружность. В системе отсчёта, связанной с Землёй, траектория точки будет довольно сложной кривой. Эту кривую называют *циклоидой*.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ С точки зрения кинематики все системы отсчёта одинаково пригодны для описания движения тел.

Это утверждение следует понимать в том смысле, что любое механическое явление можно описать в любой системе отсчёта и при этом нет оснований отдавать предпочтение какой-либо одной из них. Ни одна из систем отсчёта не является «истинной», «настоящей», выбор каждой определяется лишь соображениями удобства, целесообразности.

По значениям кинематических величин в одной системе отсчёта можно рассчитывать значения этих же величин в любой другой системе отсчёта.

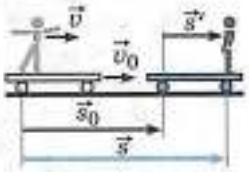


Рис. 1.15

Типичным примером относительной величины в механике служит перемещение $\vec{s}$ тела. Если в движущемся поезде пассажир перейдёт из одного конца вагона в другой, модуль его перемещения s' в системе отсчёта, связанной с вагоном, будет равен нескольким метрам. В системе отсчёта, связанной с Землёй (рис. 1.15), перемещение $\vec{s}$ того же пассажира будет складываться из его перемещения $\vec{s}'$ относительно вагона и перемещения $\vec{s}_0$ самого вагона относительно Земли:

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

В случае когда одна система отсчёта движется относительно другой с постоянной скоростью $\vec{v}_0$, это выражение принимает вид

$$\vec{s} = \vec{s}' + \vec{v}_0 \Delta t. \qquad (8.1)$$

Разделив обе части уравнения (8.1) на одинаковый во всех системах отсчёта малый промежуток времени Δt, получим

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

При $\Delta t \to 0$ будем иметь

$$\boxed{\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_0.} \qquad (8.2)$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Формула (8.2) представляет собой выражение *классического закона сложения скоростей*.

Классический закон сложения скоростей имеет ограниченную область применения. Он выполняется с высокой степенью точности при значениях скоростей v_0 и v', много меньших скорости света c в вакууме, равной 300 000 км/с.

Автомобили и поезда, самолёты и космические ракеты, планеты и искусственные спутники Земли движутся относительно Земли со скоростями, значительно меньшими скорости света. Поэтому для описания их движения при переходе из системы отсчёта, связанной с Землёй, к любой другой системе отсчёта, движущейся относительно Земли со скоростью $v \ll c$, можно пользоваться классическим законом сложения скоростей.

Особого обсуждения требует вопрос об ускорении в различных системах отсчёта.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Если рассматривать любые системы отсчёта, движущиеся с ускорением относительно друг друга, то ускорение тела не является инвариантной величиной.

Однако в системах отсчёта, движущихся равномерно и прямолинейно относительно друг друга, ускорение тела одно и то же, т. е. инвариантно. К этому выводу легко прийти, используя классический закон сложения скоростей.

Пусть в одной системе отсчёта за промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$ скорость движения тела изменилась от $\vec{v}_1$ до $\vec{v}_2$. Скорости $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ этого же тела в моменты времени t_1 и t_2 в другой системе отсчёта, движущейся со скоростью $\vec{v}_0 = \text{const}$ относительно первой, можно найти по закону сложения скоростей:

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_1' + \vec{v}_0, \qquad \vec{v}_2 = \vec{v}_2' + \vec{v}_0.$$

Вычтем одно равенство из другого. Изменения скорости в обеих системах отсчёта оказываются одинаковыми:

$$\vec{v}_2 - \vec{v}_1 = \vec{v}_2' - \vec{v}_1',$$

или $\Delta\vec{v} = \Delta\vec{v}'$.

Разделив обе части равенства на промежуток времени Δt, в течение которого произошло изменение скорости движения тела на $\Delta\vec{v}$, получим

$$\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{\Delta\vec{v}'}{\Delta t}.$$

В пределе, при $\Delta t \to 0$, будем иметь $\vec{a} = \vec{a}'$, т. е. ускорение тела одно и то же в обеих системах отсчёта.

Инвариантные характеристики. Относительность движения. Закон сложения скоростей

1. Какие кинематические величины имеют одинаковые значения в различных системах отсчёта? 2. Какие кинематические величины зависят от выбора системы отсчёта? 3. Приведите примеры, иллюстрирующие относительность траектории. 4. Инвариантно ли ускорение тела в системах отсчёта, движущихся равномерно и прямолинейно относительно друг друга? 5. При каких условиях применим классический закон сложения скоростей?

ЗАДАЧА. Рассчитайте радиус $R_{\text{ок}}$ окружности, совпадающей с участком траектории точки колеса радиусом R (циклоиды) в её верхней точке.

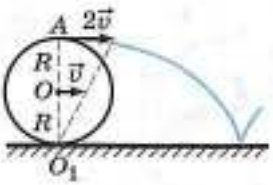


Рис. 1.16

Решение. Ускорение точки A (рис. 1.16) инвариантно в движущихся с постоянной скоростью относительно друг друга системах отсчёта; относительно системы отсчёта, связанной с осью колеса, оно равно $a_{\text{ис}_1} = \frac{v_1^2}{R}$, а относительно Земли $a_{\text{ис}_2} = \frac{v_2^2}{R_{\text{ок}}}$, где v_1 — скорость этой точки относительно центра O колеса; v_2 — скорость этой же точки относительно точки O_1.

Обозначив буквой v скорость движения центра O колеса, получим $v_2 = 2v$. В соответствии с законом сложения скоростей $v_1 = 2v - v = v$.

Из инвариантности ускорений ($a_{\text{ис}_1} = a_{\text{ис}_2}$) следует: $\frac{v^2}{R} = \frac{(2v)^2}{R_{\text{ок}}}$, откуда $R_{\text{ок}} = 4R$.

РЕШИТЕ

8.1. Ракета на высоте 100 м разрывается в воздухе на два осколка. Скорость первого осколка равна 60 м/с и направлена вертикально вверх, скорость второго равна 40 м/с и направлена вертикально вниз. На каком расстоянии друг от друга окажутся осколки через 0,5 с?

8.2. Два камня падают с высоты 80 м, причём второй камень начал падать на 2 с позже первого. Постройте график зависимости проекции скорости первого камня на вертикальную ось в системе отсчёта, связанной со вторым камнем. Ускорение свободного падения примите равным 10 м/с^2.

8.3. Пловец переплывает реку шириной l. Под каким углом к направлению вектора скорости течения воды он должен плыть, чтобы попасть на противоположный берег за самое короткое время? Чему равно перемещение пловца относительно берега, если скорость течения реки v_1, а скорость пловца относительно воды v_2?

8.4. Ракета стартовала с поверхности Земли и двигалась вертикально вверх с ускорением 5 м/с^2 в течение 10 с, пока работали её двигатели. Сколько времени пройдёт с момента прекращения работы двигателей до момента падения ракеты на Землю? Сопротивление воздуха не учитывайте.

8.5. Два автомобиля за одинаковое время набрали одинаковую скорость. Первый автомобиль двигался в течение времени t_1 с ускорением a_1, а затем в течение времени t_2 с ускорением a_2. Второй автомобиль двигался в течение времени t_2 с ускорением a_2, а затем в течение времени t_1 с ускорением a_1. В каком случае перемещение тела будет больше, если $a_1 > a_2$? Решите задачу в общем случае.

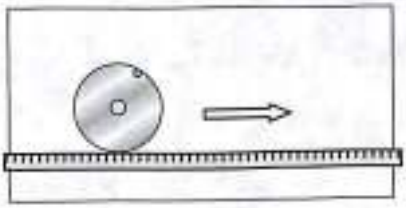
Проверьте своё решение для частного случая: $t_1 = 5$ с, $a_1 = 2$ м/с^2, $t_2 = 10$ с, $a_2 = 1$ м/с^2.

8.6. Два автомобиля приближаются к перекрёстку по взаимно перпендикулярным траекториям с постоянными скоростями v_1 и v_2. В момент времени, когда первый автомобиль достиг перекрёстка, второй находился на расстоянии l_0 от него. Определите минимальное расстояние между автомобилями в процессе движения.

Постройте экспериментальную циклоиду. Для этого исследуйте траекторию движения точки обода колеса. Вам понадобится простое оборудование: лист бумаги, длинная линейка, CD (старый) и карандаш.

Это исследование лучше проводить вдвоём.

Прикрепите к столу лист бумаги, на длинный край листа положите линейку и закрепите её. На краю диска фломастером поставьте яркую точку. Положите диск на бумагу так, чтобы он мог катиться по линейке (см. рис.). Далее перемещайте без проскальзывания диск вдоль линейки, отмечая карандашом на бумаге положение яркой точки.



Соедините плавной линией карандашные точки и исследуйте полученную кривую.

§ 9. Основные понятия и законы динамики

Повторите: основные задачи и понятия динамики.

В кинематике движение тел изучается без выяснения законов взаимодействия тел и причин возникновения ускорений.

ЗАПОМНИТЕ Раздел механики, изучающий законы взаимодействия и движения тел, называется **динамикой**.

Первый закон Ньютона. Развитие механики как экспериментальной науки началось в XVII в. Великий итальянский учёный Галилео Галилей (1564—1642) на основе экспериментальных исследований движения шаров по наклонной плоскости сделал общий вывод о том, что скорость любого тела изменяется только в результате его *взаимодействия* с другими телами.

ЗАПОМНИТЕ Явление сохранения скорости движения тела при отсутствии внешних воздействий называется **инерцией**.

Великий английский учёный Исаак Ньютон (1643—1727) сформулировал один из основных законов механики — *закон инерции*.

ЗАКОН ИНЕРЦИИ Всякое тело находится в покое или движется равномерно и прямолинейно, если на него не действуют другие тела.

Закон инерции называют *первым законом Ньютона* или *первым законом механики*.

ЗАПОМНИТЕ Свойство тел сохранять своё состояние покоя или движения с постоянной скоростью называется **инертностью** тел.

Инертность проявляется в том, что при внешнем воздействии тело не может мгновенно перейти из состояния покоя в состояние движения или из состояния движения в состояние покоя. Легко изменить скорость движения воздушного шарика, но трудно изменить скорость автобуса. Следовательно, инертность разных тел может быть различной.

Масса. Для количественного сравнения инертности разных тел в физике используется физическая величина, называемая *массой* тела.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Масса является мерой инертности тела.

Для сравнения масс различных тел необходимо выбрать тело, масса которого принимается за единицу массы. Таким телом служит эталон из сплава иридия с платиной, хранящийся в Международном бюро мер и весов (Франция). Единица массы в Международной системе, равная массе этого эталона, называется килограмм (кг).

На практике для измерения масс тел используется связь свойства инертности тел со свойством их притяжения к Земле. Опыты и наблюдения по-

казывают, что, чем более инертно тело, тем сильнее оно притягивается к Земле.

ЗАПОМНИТЕ Притяжение тел к Земле называется **гравитационным притяжением.**

Следовательно, масса является не только мерой инертности тел, но и мерой их способности к гравитационному взаимодействию. Самый простой и распространённый способ сравнения и измерения масс тел основан на сравнении способности тел к гравитационному притяжению с помощью равноплечих весов.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Если равноплечие весы, на чашки которых помещены два тела, находятся в равновесии, то гравитационное притяжение тел к Земле одинаково, следовательно, одинаковы и массы тел.

Инерциальные системы отсчёта. При отсутствии взаимодействий с другими телами одно и то же тело может находиться в состоянии покоя в одной системе отсчёта и двигаться с ускорением в другой системе отсчёта. Следовательно, закон инерции выполняется не в любых системах отсчёта.

ЗАПОМНИТЕ Системы отсчёта, в которых выполняется закон инерции, называются **инерциальными системами отсчёта.**

Сила. В инерциальных системах отсчёта любое изменение скорости тела происходит только в результате действия на него других тел, или, иначе, их взаимодействия. Признаком действия на тело других тел является возникновение ускорения.

ЗАПОМНИТЕ Количественной мерой взаимодействия тел является физическая векторная величина $\vec{F}$, которая называется **силой**.

Направление вектора силы $\vec{F}$ совпадает с направлением вектора ускорения $\vec{a}$ тела.

За единицу силы в Международной системе принимается сила, которая телу массой 1 кг сообщает ускорение 1 м/с^2. Эта единица называется ньютон (Н).

Силы упругости.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Возникновение ускорений является не единственным возможным результатом взаимодействия тел. Опыт показывает, что другим возможным результатом взаимодействия тел может быть изменение формы и размеров тел — *деформация тел.*

Поэтому силы можно определять не только путём измерения ускорений тел известной массы, но и путём измерения деформации тел.

ЗАПОМНИТЕ Силы, возникающие в результате деформации тел, называются **силами упругости.**

Измерение сил, возникающих при деформации тел, можно производить, используя силу тяжести. Так как ускорение $\vec{g}$ свободного падения тел под действием силы тяжести известно, сила тяжести $\vec{F} = m\vec{g}$.

Подвешивая к концу пружины тела разной массы, можно исследовать зависимость силы упругости $F_{упр}$ от деформации x. Как показывает опыт,

ЗАКОН ГУКА при малых деформациях стальной пружины сила упругости $F_{упр}$ прямо пропорциональна деформации:

$$F_{упр} = -kx.$$

Коэффициент k в формуле закона Гука называется *жёсткостью* и выражается в ньютонах на метр (Н/м). Знак «минус» указывает на то, что сила упругости направлена противоположно деформации тела.

Сложение сил.

ЗАПОМНИТЕ Сила $\vec{F}_р$, оказывающая на тело такое же действие, как две одновременно действующие на это тело силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, называется **равнодействующей сил** $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$.

Опыт показывает, что равнодействующую $\vec{F}_р$ двух сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, приложенных к одной точке тела, можно найти по правилу сложения векторов или по правилу параллелограмма:

$$\vec{F}_р = \vec{F}_1 + \vec{F}_2.$$

Пользуясь правилом параллелограмма, любой вектор силы $\vec{F}$ можно представить как равнодействующую двух векторов сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, приложенных к той же точке тела. При взаимодействии одного тела одновременно с несколькими телами каждое из тел действует независимо от других тел и равнодействующая сила $\vec{F}_р$ является суммой векторов всех действующих сил:

$$\vec{F}_р = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \ldots + \vec{F}_n = \Sigma\vec{F}.$$

Это экспериментально установленное свойство сил называют *принципом суперпозиции*.

Второй закон Ньютона. Экспериментально был установлен *второй закон Ньютона*, или *второй закон механики*.

ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА Ускорение движения тела прямо пропорционально приложенной к нему силе и обратно пропорционально массе тела:

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

В случае если к телу приложено несколько сил, ускорение $\vec{a}$ тела прямо пропорционально равнодействующей $\vec{F}_р$ всех сил и обратно пропорционально массе m тела:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_р}{m}.$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Второй закон механики выполняется только в инерциальных системах отсчёта.

Закон инерции не является простым следствием второго закона механики. Определяя понятие инерциальной системы отсчёта, он позволяет установить границы применимости второго закона механики.

Третий закон Ньютона. Опыт показывает, что при любом взаимодействии двух тел, массы которых равны m_1 и m_2, отношение модулей их ускорений остаётся постоянным и равным обратному отношению масс тел:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}.$$

Отсюда следует равенство $a_1 m_1 = a_2 m_2$.

В векторном виде это уравнение следует записать так:

$$m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2.$$

Знак «минус» означает, что при взаимодействии тел их ускорения всегда имеют противоположные направления.

Используя второй закон Ньютона, получаем равенство

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

Это выражение называется *третьим законом Ньютона*.

ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА Тела действуют друг на друга с силами, направленными вдоль одной прямой. Эти силы равны по модулю и противоположны по направлению.

Однако они не могут уравновешивать друг друга, так как приложены к разным телам.

Сила действия и сила противодействия имеют одинаковую природу.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Третий закон Ньютона выполняется только в инерциальных системах отсчёта.

Масса. Инерция. Сила. Законы Ньютона

1. Сформулируйте первый закон Ньютона. 2. Какие системы отсчёта в классической механике называют инерциальными? 3. Существуют ли в природе инерциальные системы отсчёта? 4. Как в инерциальной системе отсчёта движется тело, если векторная сумма всех сил, действующих на него, равна нулю? 5. Как в инерциальной системе отсчёта движется тело, если векторная сумма всех сил, действующих на него, не равна нулю? 6. Какая физическая величина является мерой инертности тела? 7. Какая физическая величина является мерой действия на тело других тел? 8. Как зависит сила упругости от деформации тела? 9. Сформулируйте второй закон Ньютона. 10. Как следует записать второй закон Ньютона для тела, на которое действует несколько сил? 11. В чём сущность принципа суперпозиции сил? 12. Всегда ли совпадает направление равнодействующей всех сил с направлением вектора скорости этого тела? 13. Всегда ли совпадает направление равнодействующей всех сил с на-

правлением вектора ускорения этого тела? 14. Сформулируйте третий закон Ньютона. 15. Поясните примерами особенности сил действия и противодействия.

ЗАДАЧА 1. Два тела массами m_1 и m_2, связанные нерастяжимой верёвкой, лежат на гладкой горизонтальной поверхности. Масса верёвки m_0. На второе тело действует в горизонтальном направлении сила $\vec{F}$. Определите силы, с которыми верёвка действует на каждое тело. В каком случае эти силы будут равны по модулю? Трением можно пренебречь.

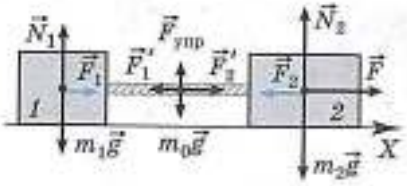


Рис. 1.17

Решение. Изобразим силы, действующие на каждое тело и верёвку (рис. 1.17): $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ — силы, с которыми верёвка действует на тела *1* и *2*; $\vec{F}_1'$ и $\vec{F}_2'$ — силы, с которыми тела действуют на верёвку.

Сила тяжести, действующая на каждое тело, скомпенсирована силами нормальной реакции опоры.

Так как верёвка нерастяжима, то модули ускорений обоих тел и верёвки одинаковы и равны a. Применим второй закон Ньютона для сил, действующих в горизонтальном направлении (сумма сил, действующих в вертикальном направлении, равна нулю):

$$F_1 = m_1 a, \quad (1)$$

$$\vec{F}_2' - \vec{F}_1' = m_0 a, \quad (2)$$

$$F - F_2 = m_2 a. \quad (3)$$

Применив третий закон Ньютона, получим

$$\vec{F}_1' = F_1, \quad \vec{F}_2' = F_2, \quad (4)$$

Используя выражения (1) — (4), получаем

$$a = \frac{F}{m_1 + m_2 + m_0}, \quad F_1 = \frac{F m_1}{m_1 + m_2 + m_0}, \quad F_2 = \frac{F(m_1 + m_0)}{m_1 + m_2 + m_0}.$$

Силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ равны по модулю в том случае, когда масса верёвки равна нулю (когда массой верёвки можно пренебречь по сравнению с массами тел).

ЗАДАЧА 2. Длинная доска массой M лежит на гладком горизонтальном столе. На доске находится брусок массой m. Коэффициент трения между бруском и доской равен μ. К бруску приложена сила, параллельная доске, её модуль зависит от времени по закону $F = \alpha t$. Исследуйте зависимость проекций ускорений бруска и доски на горизонтальную ось от времени действия силы. Начертите графики этих зависимостей.

Решение. Относительно инерциальной системы отсчёта, связанной с Землёй, на брусок действуют две силы: внешняя сила $\vec{F}$ и сила трения $\vec{f}_1$ со стороны доски, направленная в сторону, противоположную направлению внешней силы $\vec{F}$. На доску действует только одна неуравновешенная сила $\vec{f}_2$ — сила трения со стороны бруска (рис. 1.18). Силы тяжести, действующие на доску и брусок, уравновешиваются упругими силами нормальной реакции опор.

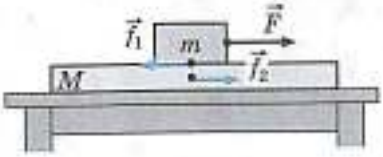


Рис. 1.18

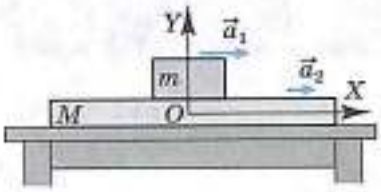


Рис. 1.19

Уравнения второго закона Ньютона в проекции на ось OX, направленную параллельно вектору силы $\vec{F}$ (рис. 1.19), можно записать в виде $F_x + f_{1x} = ma_{1x}$, $f_{2x} = Ma_{2x}$, где $F_x = F$, $f_{1x} = -f$, $f_{2x} = f$.

Следовательно, $F - f = ma_{1x}$, $f = Ma_{2x}$.

Эти уравнения имеют смысл только при значениях $a_{1x} \geqslant a_{2x}$, так как по условию задачи доска не может двигаться быстрее бруска.

В начале движения ускорения бруска и доски равны между собой: $a_{1x} = a_{2x}$, откуда $\frac{F-f}{m} = \frac{f}{M}$.

Эти ускорения будут увеличиваться со временем до тех пор, пока брусок не станет скользить по доске. Обозначим этот момент времени через t_0. Предельное значение силы F_0, при котором ускорения доски и бруска ещё равны, можно определить из условия $\frac{F_0 - f_0}{m} = \frac{f_0}{M}$, где $f_0 = \mu mg$ — максимальное значение силы трения покоя, равное силе трения скольжения.

Итак, $\frac{F_0 - \mu mg}{m} = \frac{\mu mg}{M}$, $F_0 = \mu mg\left(1 + \frac{m}{M}\right)$.

Если $F \leqslant F_0$, то $a_{1x} = a_{2x} = \frac{F}{m+M}$.

Таким образом, до момента времени t_0, равного $t_0 = \frac{F_0}{\alpha} = \frac{\mu mg}{\alpha}\left(1 + \frac{m}{M}\right)$, проекции ускорения обоих тел одинаковы и растут по линейному закону: $a = a_{1x} = a_{2x} = \frac{F}{m+M} = \frac{\alpha t}{m+M}$.

При $t > t_0$ проекции ускорения доски и бруска будут разными. Проекция ускорения доски, достигнув значения $a_{2x} = \frac{\mu mg}{M}$, останется с течением времени неизменной, в то время как проекция ускорения бруска будет увеличиваться со временем по закону $a_{1x} = \frac{\alpha t - \mu mg}{m} = \frac{\alpha t}{m} - \mu g$.

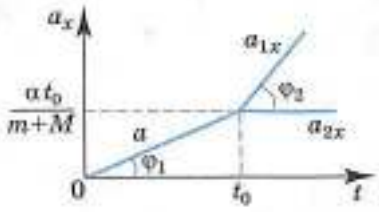


Рис. 1.20

Графически зависимости ускорений бруска и доски от времени показаны на рисунке 1.20.

ЗАДАЧА 3. Брусок массой $m_1 = 0{,}30$ кг лежит на наклонной плоскости, угол при основании которой равен 30°. Коэффициент трения бруска о плоскость равен 0,2. К бруску привязана невесомая и нерастяжимая нить, другой конец которой перекинут через неподвижный блок. К этому концу нити прикреплён груз. Определите ускорения бруска при значениях массы m_2 груза 0,05 кг; 0,15 кг; 0,25 кг. При каких значениях массы груза брусок неподвижен?

Решение. В зависимости от соотношения между значениями m_1, m_2, α и μ брусок может двигаться с ускорением вверх или вниз по наклонной плоскости или находиться в покое. При этом изменяется не только направление, но и модуль силы трения, так как сила трения может принимать различные значения.

Рассмотрим два предельных случая, когда брусок движется ускоренно вверх и ускоренно вниз по наклонной плоскости. На рисунках 1.21 и 1.22 изображены силы, действующие на брусок и груз: $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ — силы натяжения нити при ускоренном движении грузов соответственно вверх или вниз по наклонной плоскости; $\vec{N}$ — сила нормальной реакции опоры; $m_1\vec{g}$ и $m_2\vec{g}$ — силы тяжести, действующие на брусок и груз; $\vec{F}_{тр}$ — сила трения скольжения.

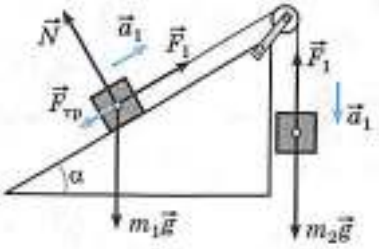


Рис. 1.21

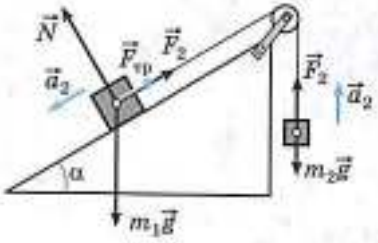


Рис. 1.22

Сила трения скольжения в каждом случае направлена в сторону, противоположную движению бруска. Так как нить нерастяжима, то модули ускорений, с которыми движутся брусок и груз, одинаковы. Вследствие невесомости нити сила натяжения по всей её длине одинакова.

1. Запишем второй закон Ньютона для проекций сил и ускорений на ось, направление которой совпадает с направлением ускорения, для случая, изображённого на рисунке 1.21:

$$F_1 - m_1 g\sin\alpha - F_{тр} = m_1 a_1, \quad (1)$$

$$m_2 g - F_1 = m_2 a_1. \quad (2)$$

Учитывая, что сила трения скольжения $F_{тр} = \mu N$, где $N = m_1 g\cos\alpha$, получим

$$F_{тр} = \mu m_1 g\cos\alpha. \quad (3)$$

Складывая уравнения (1) и (2) и заменяя значение силы трения выражением (3), получаем

$$m_2 g - m_1 g\sin\alpha - \mu m_1 g\cos\alpha = (m_1 + m_2)a_1. \quad (4)$$

Это выражение можно использовать для расчёта ускорения бруска только при условии, что $a_1 \geqslant 0$.

Определим минимальную массу груза m_2', при которой брусок ещё движется вверх по наклонной плоскости без ускорения ($a_1 = 0$):

$$m_2'g - m_1g\sin\alpha - \mu m_1g\cos\alpha = 0, \qquad m_2' = m_1(\sin\alpha + \mu\cos\alpha).$$

Следовательно, при выполнении условия $m_2 \geqslant m_1(\sin\alpha + \mu\cos\alpha)$ можно определить искомое ускорение бруска из уравнения (4):

$$a_1 = g\frac{m_2 - m_1\sin\alpha - \mu m_1\cos\alpha}{m_1 + m_2}. \qquad (5)$$

Рассчитаем числовое значение величины m_2': $m_2' = 0{,}30$ кг $\cdot$ $(\sin 30° + 0{,}20\cos 30°) = 0{,}20$ кг. Сравнивая полученное значение с данными, представленными в условии, делаем вывод, что рассчитать ускорение бруска по формуле (5) можно лишь при значении $m_2 \geqslant 0{,}20$ кг. Пусть $m_2 = 0{,}25$ кг:

$$a_1 = 9{,}81 \text{ м/с}^2 \cdot \frac{0{,}25 - 0{,}30\cdot 0{,}5 - 0{,}20\cdot 0{,}30\cdot\sqrt{3}/2}{0{,}30 + 0{,}25} = 0{,}86 \text{ м/с}^2.$$

2. Запишем второй закон Ньютона для проекций сил и ускорений на ось, направление которой совпадает с направлением ускорения, для случая, изображённого на рисунке 1.22:

$$m_1g\sin\alpha - F_2 - F_{тр} = m_1a_2, \qquad F_2 - m_2g = m_2a_2.$$

Учитывая, что сила трения скольжения равна $F_{тр} = \mu m_1g\cos\alpha$, получим, сложив оба уравнения:

$$m_1g\sin\alpha - m_2g - \mu m_1g\cos\alpha = (m_1 + m_2)a_2. \qquad (6)$$

Полученное выражение можно использовать для расчёта ускорения бруска только при условии, что $a_2 \geqslant 0$.

Определим максимальную массу груза m_2'', при которой брусок ещё движется вниз по наклонной плоскости без ускорения ($a_2 = 0$):

$$m_1g\sin\alpha - m_2''g - \mu m_1g\cos\alpha = 0, \qquad m_2'' = m_1(\sin\alpha - \mu\cos\alpha).$$

Следовательно, при выполнении условия $m_2 \leqslant m_1(\sin\alpha - \mu\cos\alpha)$ можно определить ускорение бруска из уравнения (6):

$$a_2 = g\frac{m_1\sin\alpha - m_2 - \mu m_1\cos\alpha}{m_1 + m_2}. \qquad (7)$$

Рассчитаем числовое значение величины m_2'':

$$m_2'' = 0{,}30 \text{ кг}(\sin 30° - 0{,}20\cos 30°) = 0{,}10 \text{ кг}.$$

Сравнивая полученное значение с данными, представленными в условии, делаем вывод, что рассчитать ускорение бруска по формуле (7) можно лишь при значении $m_2 = 0{,}05$ кг, так как $m_2 < m_2''$:

$$a_2 = 9{,}81 \text{ м/с}^2 \cdot \frac{0{,}30\cdot 0{,}50 - 0{,}05 - 0{,}20\cdot 0{,}30\cdot\sqrt{3}/2}{0{,}05 + 0{,}30} = 1{,}4 \text{ м/с}^2.$$

3. При выполнении условия

$$m_1(\sin\alpha + \mu\cos\alpha) > m_2 > m_1(\sin\alpha - \mu\cos\alpha)$$

брусок не будет двигаться ни вниз, ни вверх по наклонной плоскости, т. е. будет находиться в покое.

Для конкретных чисел, заданных в условии, будем иметь

$$0{,}20 \text{ кг} > m_2 > 0{,}10 \text{ кг}.$$

Следовательно, при $m_2 = 0{,}15$ кг брусок будет находиться в покое.

В чём же причина того, что система покоится не при одном значении массы груза m_2, а в интервале значений примерно от 0,2 до 0,1 кг? Оказывается, причина состоит в особенности силы трения покоя, заключающейся в том, что она может изменяться при изменении внешней силы, действующей на тело.

РЕШИТЕ

9.1. Грузы массами 1,0 и 1,5 кг связаны невесомой и нерастяжимой нитью. Нить перекинута через неподвижный блок. Определите силу давления нити на ось блока, если силой трения между нитью и блоком, а также его массой можно пренебречь.

9.2. Брусок массой 0,3 кг лежит на наклонной плоскости, угол при основании которой составляет $\alpha = 30°$. Коэффициент трения бруска о плоскость равен 0,2. К бруску привязана нить, другой конец которой перекинут через неподвижный блок. К этому концу нити прикреплён груз массой 0,2 кг. Определите ускорение тел и силу упругости нити.

9.3. На наклонной плоскости лежит брусок. Начертите график зависимости ускорения бруска от угла наклона плоскости к горизонту для $\mu = 0{,}6$.

9.4. Силой, движущей поезд, является сила трения колёс тепловоза о рельсы. Тормозит же движение сила трения колёс вагонов о рельсы. Поскольку масса вагонов больше массы тепловоза, а коэффициент трения колёс о рельсы одинаков, следует вывод: тепловоз не сдвинет состав. Найдите ошибку в рассуждениях.

9.5. Сани начинают двигаться по горизонтальной поверхности со скоростью 10 м/с. Коэффициент трения μ между полозьями саней и дорогой равен 0,1. Какой путь пройдут сани за 15 с?

9.6. Сани из состояния покоя съезжают со склона горы длиной 50 м за 5 с. Определите коэффициент трения скольжения саней о поверхность горы, если склон горы с горизонтом составляет угол $\alpha = 30°$.

9.7. Сани массой $m = 50$ кг перемещаются по горизонтальной поверхности под воздействием силы $F = 200$ Н, направленной под углом $\alpha = 30°$ к горизонту. Чему равно ускорение движения саней в момент начала движения, если коэффициент трения саней о снежный наст $\mu = 0{,}1$?

9.8. На горизонтальную поверхность стола вертикально падает быстро вращающийся цилиндр. Чему равен угол между направлением отскока и нормалью к горизонтальной поверхности, если коэффициент трения скольжения цилиндра о поверхность равен μ?

Возьмите стакан и поставьте его на лист бумаги. Лист бумаги поместите на краю стола. Потяните за край листа: сначала медленно, а затем очень быстро. Что будет происходить со стаканом в первом и во втором случаях? Обоснуйте ответ, используя законы Ньютона.

§ 10. Прямая и обратная задачи механики

Повторите: сила тяжести, ускорение свободного падения.
Посмотрите фильм BBC «Чудеса Солнечной системы»: 1) «Империя Солнца», 2) «Порядок из хаоса», 3) «Тонкая голубая линия», 4) «Мёртвое или живое».

Прямая задача механики материальной точки.

ЗАПОМНИТЕ Основная задача механики — **прямая задача механики** — определение координат тела известной массы и его скорости в любой момент времени по силам, действующим на тело, и по известным начальным условиям.

Для её решения необходимо знать координаты и скорость тела в некоторый начальный момент времени.

Силы в механике зависят от координат или скорости движения одного тела относительно другого.

Для нахождения координат тела в любой момент времени необходимо по известным значениям сил, действующих на тело в данный момент, и известной массе тела определить его ускорение, затем найти новое значение скорости тела, его перемещение и координаты.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Таким образом, решение основной задачи механики проводится по следующей схеме:

— в соответствии с первым законом Ньютона выбирается наиболее удобная инерциальная система отсчёта;

— в соответствии с принципом суперпозиции находится векторная сумма сил $\Sigma\vec{F}$, действующих на тело, или записываются проекции сил на координатные оси;

— в соответствии со вторым законом Ньютона определяется ускорение тела в данной системе отсчёта:

$$\vec{a} = \frac{\Sigma\vec{F}}{m}, \text{ или } a_x = \frac{F_x}{m},\ a_y = \frac{F_y}{m},\ a_z = \frac{F_z}{m};$$

— по ускорениям и начальным условиям находят скорости и координаты материальной точки в любой момент времени.

Прямая задача механики легко решается в случае движения тел под действием постоянной силы. При движении тел у поверхности Земли силу тяжести, действующую на тела, можно считать постоянной. Следовательно, во время всего полёта тело, брошенное под углом α к горизонту, движется с постоянным ускорением, равным ускорению свободного падения $\vec{g}$. Это даёт возможность, зная начальные условия (координаты и скорость), рассчитать высоту и дальность полёта и результаты расчёта проверить экспериментально. В случае действия сил, зависящих от координат, расчёт движения тел оказывается более сложной задачей.

Прямую задачу механики часто приходится решать инженерам. Например, зная гравитационные силы, действующие со стороны планет на космический корабль, можно рассчитывать его траекторию в космическом пространстве. Зная силу взаимодействия гребного винта с водой и силу сопротивления

воды движению корпуса судна, можно определить, как будет двигаться судно, какую скорость оно может развить.

Обратная задача механики.

ЗАПОМНИТЕ **Обратная задача механики** — определение действующих на тело сил по закону его движения.

Именно путём решения обратной задачи механики установлены многие фундаментальные законы природы, открыты действующие в природе силы.

Законы Кеплера. В XVI в. астроном Тихо Браге, в течение многих лет наблюдавший планеты, смог с наибольшей возможной в то время точностью определить их координаты в различные моменты времени.

Обрабатывая результаты наблюдений Тихо Браге, астроном Иоганн Кеплер установил формы орбит траекторий, по которым движутся планеты, и некоторые особенности движения планет по этим орбитам, которые он сформулировал в виде законов.

Первый закон описывает геометрию траекторий планетарных орбит.

ПЕРВЫЙ ЗАКОН КЕПЛЕРА Траектории, по которым движутся планеты, представляют собой эллипсы, в одном из фокусов которых находится Солнце (рис. 1.23).

ИНТЕРЕСНО Напомним, что эллипс представляет собой множество точек плоскости, сумма расстояний от которых до двух фиксированных точек — *фокусов* — равна постоянному числу. *Эксцентриситеты* (степень вытянутости) орбит и их удаления от Солнца в *перигелии* (ближайшей к Солнцу точке) и *апогелии* (самой удалённой точке) у всех планет разные, но все эллиптические орбиты роднит одно — Солнце расположено в одном из двух фокусов эллипса.

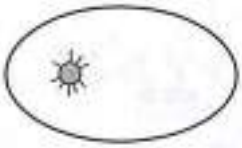


Рис. 1.23

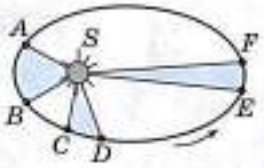


Рис. 1.24

Второй закон описывает изменение скорости движения планет вокруг Солнца.

ВТОРОЙ ЗАКОН КЕПЛЕРА Радиус-вектор планеты, проведённый из Солнца, «заметает» за равные промежутки времени одинаковые площади (рис. 1.24).

Чем дальше от Солнца уводит планету эллиптическая орбита, тем медленнее движение планеты, чем ближе к Солнцу, тем быстрее.

В первых двух законах речь идёт о специфике орбитальных траекторий отдельно взятой планеты.

Третий закон Кеплера позволяет сравнить орбиты планет между собой.

ТРЕТИЙ ЗАКОН КЕПЛЕРА Для всех планет отношение квадрата периода обращения к кубу большой полуоси эллиптической орбиты имеет одно и то же значение:

$$\frac{T^2}{R^3} = \frac{1}{k}, \qquad (10.1)$$

Становится понятным, что для более удалённых от Солнца планет полный оборот при движении по орбите занимает больше времени и тем дольше соответственно длится «год» на этой планете. Это обусловлено двумя факторами:

— чем дальше планета находится от Солнца, тем длиннее периметр её орбиты;

— с ростом расстояния от Солнца снижается и линейная скорость движения планеты.

Открытие закона всемирного тяготения. Примером решения обратной задачи механики является открытие закона всемирного тяготения.

Причины таких закономерностей движения планет пытался выяснить и сам Кеплер. Однако строгое научное объяснение планетных движений было дано лишь И. Ньютоном. В упрощённой форме вывод закона всемирного тяготения из законов Кеплера и законов механики можно выполнить следующим образом.

Считая, что планеты движутся по окружностям, найдём центростремительное ускорение любой планеты:

$$a_{цс} = \frac{v^2}{R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2}, \qquad (10.2)$$

где T — период обращения планеты вокруг Солнца; R — радиус её орбиты. Из выражений (10.1) и (10.2) получаем, что ускорение любой планеты независимо от её массы обратно пропорционально квадрату радиуса её орбиты:

$$a_{цс} = \frac{4\pi^2 Rk}{R^3} = 4\pi^2 k \frac{1}{R^2}.$$

Согласно второму закону механики сила, сообщающая планете это ускорение, равна:

$$F = ma_{цс} = 4\pi^2 k \frac{m}{R^2}, \qquad (10.3)$$

т. е. сила, действующая на любую планету, прямо пропорциональна массе планеты и обратно пропорциональна квадрату расстояния от неё до Солнца.

Согласно третьему закону механики сила, действующая со стороны Солнца на планету, равна по модулю и противоположна по направлению силе, с которой планета действует на Солнце. Обозначим последнюю через $\vec{F'}$ и по аналогии с формулой (10.3) запишем её выражение: $F' = 4\pi^2 k' \frac{M}{R^2}$, где M — масса Солнца.

Так как $F = F'$, то $4\pi^2 k \frac{m}{R^2} = 4\pi^2 k' \frac{M}{R^2}$. Введём обозначение:

$$\frac{4\pi^2 k}{M} = \frac{4\pi^2 k'}{m} = G,$$

где G — постоянная величина. Следовательно, $4\pi^2 k = GM$, и выражение (10.3) можно записать в виде

$$F = G\frac{mM}{R^2}. \qquad (10.4)$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Формула (10.4) есть математическая запись закона для *силы тяготения*, действующей между Солнцем и планетами: сила тяготения пропорциональна массе Солнца и массе планеты и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Сила всемирного тяготения и сила тяжести. Ньютон не остановился на получении выражения для силы тяготения, действующей между Солнцем и планетами. Он предположил, что природа силы, удерживающей планеты на их орбитах, тождественна по природе силе тяжести, действующей на все тела у земной поверхности.

Для проверки этого предположения Ньютон применил полученный закон (10.4) для вычисления ускорения движения Луны вокруг Земли, т. е. решил прямую задачу механики. Ускорение Луны, движущейся под действием силы тяготения вокруг Земли по орбите, близкой к круговой, равно:

$$a_{\text{Л}} = \frac{F_{\text{тяг}}}{m_{\text{Л}}} = \frac{Gm_{\text{Л}}M}{m_{\text{Л}}R_{\text{Л}}^2} = G\frac{M}{R_{\text{Л}}^2}, \qquad (10.5)$$

где M — масса Земли; $R_{\text{Л}}$ — расстояние от Земли до Луны. Поскольку сила тяготения тождественна по своей природе силе тяжести, действующей вблизи поверхности Земли, то для ускорения свободного падения тела любой массы m у поверхности Земли можно написать выражение

$$g = \frac{F_{\text{тяг}}}{m} = \frac{GmM}{mR_{\text{З}}^2} = G\frac{M}{R_{\text{З}}^2}, \qquad (10.6)$$

где $R_{\text{З}}$ — радиус Земли.

Определим из выражения (10.6) постоянную G: $G = \frac{gR_{\text{З}}^2}{M}$.

Подставив её в выражение (10.5), получим $a_{\text{Л}} = \frac{gR_{\text{З}}^2}{M} \cdot \frac{M}{R_{\text{Л}}^2} = \frac{gR_{\text{З}}^2}{R_{\text{Л}}^2}$. Но расстояние от Земли до Луны в 60 раз больше радиуса Земли ($R_{\text{Л}} = 60R_{\text{З}}$), поэтому $a_{\text{Л}} = \frac{9{,}8\ \text{м/с}^2}{60^2} = 2{,}7 \cdot 10^{-3}\ \text{м/с}^2$.

Экспериментальное значение ускорения Луны можно получить из кинематических расчётов: $a_{\text{Л}} = \frac{v^2}{R_{\text{Л}}} = \frac{4\pi^2 R_{\text{Л}}}{T^2}$, где T — период обращения Луны вокруг Земли. Подставляя значения $R_{\text{Л}} = 3{,}84 \cdot 10^8$ м, $T = 27{,}3$ сут. $= 27{,}3 \cdot 86\,400$ с, получаем $a_{\text{Л}} = 2{,}7 \cdot 10^{-3}$ м/с^2.

Хорошее соответствие результатов, полученных обоими способами, подтверждает предположение о единой природе силы, удерживающей Луну на орбите, и силы тяжести.

Обобщив этот вывод на все тела в природе, Ньютон получил *закон всемирного тяготения*.

ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ Все тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной их массам и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:

$$F_{тяг} = \frac{Gm_1m_2}{R^2}. \qquad (10.7)$$

ЗАПОМНИТЕ Коэффициент пропорциональности G, одинаковый для всех тел в природе, получил название **гравитационной постоянной**.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Формула (10.7) применима для материальных точек, а также для шаров, плотность которых распределена сферически симметрично относительно их центров.

В других случаях для вычисления силы взаимодействия тел произвольной формы их мысленно разбивают на малые участки, находят силы взаимодействия всех участков и затем суммируют векторно все эти силы.

Гравитационная постоянная*[1]. Предположение о том, что гравитационные силы должны действовать между любыми материальными телами, экспериментально было доказано английским физиком Г. Кавендишем (1731—1810) в 1788 г.

Кавендиш выполнил опыты по обнаружению гравитационного взаимодействия тел небольших размеров с помощью крутильных весов. Два одинаковых небольших шара из свинца диаметром примерно 5 см каждый были укреплены на стержне длиной около 2 м, подвешенном на тонкой медной проволоке. Против малых шаров он устанавливал большие свинцовые шары диаметром 20 см каждый (рис. 1.25). Опыты показали, что при этом стержень с малыми шарами поворачивался, что говорит о наличии силы притяжения между свинцовыми шарами.

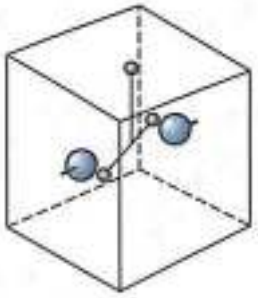


Рис. 1.25

Повороту стержня препятствует сила упругости, возникающая при закручивании подвеса. Эта сила пропорциональна углу поворота. Силу гравитационного взаимодействия шаров, равную силе упругости, можно определить по углу поворота подвеса.

Массы шаров m_1 и m_2, расстояние R между ними в опыте Кавендиша были известны, сила гравитационного взаимодействия $F_т$ измерялась непосредствен-

[1] Здесь и далее материал, отмеченный звёздочкой, рекомендуется для дополнительного чтения.

но, поэтому опыт позволил определить гравитационную постоянную G в законе всемирного тяготения. По современным данным:

$$G = 6{,}6720 \cdot 10^{-11}\ \text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}.$$

Определение масс небесных тел*. Нахождение массы планеты, у которой есть спутники, — задача несложная. Планета массой M притягивает свой спутник массой m, расположенный на расстоянии R от центра планеты, с силой, которая определяется законом всемирного тяготения:

$$F_{\text{тяг}} = G\frac{mM}{R^2}.$$

В соответствии со вторым законом Ньютона эта сила сообщает спутнику ускорение

$$a = \frac{F_{\text{тяг}}}{m} = G\frac{M}{R^2}.$$

Для простоты расчёта будем считать, что спутник движется по круговой орбите радиусом R. Тогда ускорение, которое мы определяем, равно центростремительному ускорению спутника при движении его по орбите:

$$a_{\text{цс}} = \frac{v^2}{R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2},$$

где T — период обращения спутника вокруг планеты; v — скорость движения спутника по орбите.

Приравнивая два выражения для ускорения, получаем

$$G\frac{M}{R^2} = \frac{v^2}{R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2}.$$

Отсюда находим

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

Значения R и T для спутника планеты можно определить из астрономических наблюдений. Понятно, что таким же путём можно найти и массу Солнца, если рассматривать планеты в качестве его спутников.

Если у планеты нет спутника, то задача определения её массы сложнее. В этом случае приходится вычислять ускорение, которое вызывает исследуемая планета у других, более удалённых небесных тел. Такие измерения трудны и менее точны. Чем больше расстояние до небесного тела, тем меньше получаемое им ускорение, тем труднее его измерить.

В настоящее время стало возможным определение масс планет по ускорениям, которые они вызывают у пролетающих вблизи них космических аппаратов.

Траектория движения планет. Иоганн Кеплер. Тихо Браге

1. Какие экспериментальные факты были использованы И. Ньютоном при выводе закона всемирного тяготения? 2. Как можно измерить массу Земли? 3. Какими сведениями необходимо располагать о спутнике планеты для того, чтобы можно было определить массу планеты?

ЗАДАЧА 1. Чему должен быть равен радиус круговой орбиты искусственного спутника Земли, чтобы спутник всё время находился над одной и той же точкой земной поверхности на экваторе?

Решение. Для того чтобы спутник, двигаясь по круговой орбите, находился всё время над одной и той же точкой земной поверхности на экваторе, необходимо, чтобы период обращения спутника вокруг Земли T_c был равен периоду обращения Земли вокруг своей оси $T_з$.

Центростремительное ускорение спутника, создаваемое силой гравитационного притяжения его к Земле, равно $a_{цс} = \frac{F_{тяг}}{m}$.

Выразим это ускорение через скорость спутника и радиус его орбиты, а силу $F_{тяг}$ с помощью закона всемирного тяготения:

$$a_{цс} = \frac{v^2}{R} = \frac{4\pi^2 R^2}{T_c^2} \cdot \frac{1}{R} = \frac{4\pi^2 R}{T_c^2}, \quad F_{тяг} = G\frac{mM}{R^2},$$

где R — радиус орбиты; M — масса Земли. Далее получим $\frac{4\pi^2 R}{T_c^2} = G\frac{M}{R^2}$. Отсюда $R = \sqrt[3]{\frac{GMT_c^2}{4\pi^2}} = \sqrt[3]{\frac{GMT_з^2}{4\pi^2}}$.

Расчёты дают следующий результат:

$$R = \sqrt[3]{\frac{6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot 6 \cdot 10^{24} \cdot (86\,400)^2}{4\pi^2}}\ (\text{м}) = 4{,}2 \cdot 10^7\ \text{м}.$$

ЗАДАЧА 2. Определите ускорение свободного падения у поверхности Солнца по следующим данным: расстояние от Земли до Солнца равно $1{,}496 \cdot 10^{11}$ м, угол, под которым видно Солнце с Земли, равен 32′, период обращения Земли вокруг Солнца равен $3{,}1557 \cdot 10^7$ с.

Решение. Ускорение свободного падения на Солнце

$$g_C = G\frac{M_C}{R_C^2}, \qquad (1)$$

где M_C и R_C — масса и радиус Солнца соответственно.

Радиус Солнца R_C можно определить из геометрического соотношения

$$R_C = \frac{D}{2} = \frac{R\sin\alpha}{2}, \qquad (2)$$

где R — расстояние от Земли до Солнца; α — угол, под которым виден диаметр Солнца с Земли.

Массу Солнца определим, применив второй закон Ньютона к движению Земли вокруг Солнца:

$$F_{тяг} = M_з a_{цс}, \quad G\frac{M_з M_C}{R^2} = M_з\frac{4\pi^2 R}{T_з^2},$$

откуда

$$M_C = \frac{4\pi^2 R^3}{GT_з^2}. \qquad (3)$$

Из выражений (1)—(3) получим $g_C = G\dfrac{4\pi^2R^3 \cdot 4}{GT_3^2R^2\sin^2\alpha} = \dfrac{16\pi^2R}{T_3^2\sin^2\alpha}$;

$$g_C = \frac{16\pi^2 \cdot 149{,}6 \cdot 10^9}{(3{,}1557 \cdot 10^7)^2 \cdot \sin^2 32'}\ (\text{м/с}^2) \approx 274\ \text{м/с}^2.$$

РЕШИТЕ

10.1. Согласно второму закону Ньютона ускорение тела обратно пропорционально его массе. Почему же при свободном падении ускорения всех тел одинаковы?

10.2. Считая орбиты планет круговыми, определите зависимость периода обращения планеты вокруг Солнца от радиуса её орбиты. Как изменилась бы эта зависимость, если бы сила тяготения была обратно пропорциональна не квадрату расстояния между планетой и Солнцем, а кубу расстояния?

10.3. Определите массу Солнца, считая, что Земля обращается вокруг него по круговой орбите радиусом $R = 1{,}5 \cdot 10^{11}$ м.

10.4. Определите массу планеты Марс, если известно, что спутник Марса — Фобос — обращается вокруг него по орбите радиусом $R = 9400$ км с периодом $T = 7$ ч 39 мин.

10.5. Космический корабль движется по круговой орбите вокруг Земли с периодом, равным периоду обращения Луны вокруг Земли. Во время движения корабль находится на прямой, соединяющей центры Земли и Луны, на таком расстоянии от Земли, что силы притяжения, действующие на него со стороны Земли и Луны, равны друг другу. Работают ли двигатели корабля? Если работают, то в какую сторону происходит выброс газа из двигателей? Чему равен вес космонавта массой 70 кг на корабле? Период обращения Луны вокруг Земли 27,3 сут., отношение масс Земли и Луны 81, расстояние от Земли до Луны составляет 60 земных радиусов, радиус Земли 6400 км.

Вклад Тихо Браге в развитие астрономии.

§ 11. Принцип относительности

Повторите: сила тяжести, ускорение свободного падения.

Принцип относительности и система отсчёта. Законами Ньютона можно пользоваться не в любой системе отсчёта, а только в инерциальных системах.

В системах отсчёта, движущихся относительно друг друга равномерно и прямолинейно, ускорение — величина инвариантная. В механике рассматриваются силы, зависящие от расстояния между телами (силы тяготения), от деформации тела (силы упругости), от относительной скорости движения одного тела относительно другого (силы трения). Но и расстояние, и деформация, и относительная скорость — величины, инвариантные в системах отсчёта, движущихся равномерно и прямолинейно относительно друг друга. Поэтому в таких системах отсчёта сила также является инвариантной величиной.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Если при переходе из одной системы отсчёта в другую, движущуюся относительно первой прямолинейно и равномерно, силы, ускорения и массы тел не меняются, то при таком переходе остаются неизменными и все соотношения между этими величинами, в том числе и законы Ньютона.

Г. Галилей, исходя из наблюдений над природными явлениями, сформулировал фундаментальный физический принцип (впоследствии названный *классическим принципом относительности*).

КЛАССИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Во всех инерциальных системах отсчёта все механические явления протекают одинаково при одинаковых начальных условиях.

Оговорка о том, что должны быть заданы одинаковые начальные условия, играет весьма существенную роль. Например, наблюдатели на Земле и в вагоне, движущемся относительно её поверхности равномерно и прямолинейно, следя за свободным падением тела, увидят разные траектории движения. Если тело в начальный момент неподвижно относительно Земли, то в системе отсчёта, связанной с Землёй, траекторией тела является прямая линия, а в системе отсчёта, связанной с вагоном, — парабола. Это, однако, не противоречит принципу относительности, так как в этих системах отсчёта различны начальные условия. В момент начала падения в системе отсчёта, связанной с Землёй, рассматриваемое тело покоится, а в системе отсчёта, связанной с движущимся вагоном, оно имеет начальную скорость, равную по модулю скорости движения вагона относительно Земли, но направленную в противоположную сторону. Именно поэтому падение тела и выглядит неодинаково для разных наблюдателей.

Но если в равномерно и прямолинейно движущемся вагоне тело в начальный момент времени неподвижно относительно вагона, то, как утверждает классический принцип относительности, в вагоне всё произойдёт точно так

же, как и на Земле: траекторией падающего тела будет прямая. Время падения его на пол вагона будет равно времени падения тела с той же высоты на Землю. Опыты подтверждают этот принцип.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Классический принцип относительности утверждает одинаковость протекания механических явлений в разных инерциальных системах отсчёта, но отсюда не следует, что все механические величины в этих системах одинаковы.

Например, скорость летящей птицы, измеренная в системе отсчёта «берег», будет отличаться от скорости, измеренной в системе отсчёта «корабль». Но нет никаких оснований считать, что одна из этих скоростей «истинная», а другая нет. Иными словами,

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ классический принцип относительности, раскрывая относительность некоторых характеристик движения (перемещения, координаты, скорости), утверждает абсолютность законов динамики (законов Ньютона).

Именно поэтому, находясь в какой-либо инерциальной системе отсчёта, нельзя с помощью механических опытов установить, движется эта система равномерно и прямолинейно или покоится. Нет никаких оснований отдать какой-либо из систем отсчёта предпочтение.

Преобразования Галилея. Если координаты некоторой материальной точки заданы в одной инерциальной системе отсчёта, то можно вычислить координаты этой же точки в любой другой инерциальной системе, движущейся относительно первой равномерно и прямолинейно.

Свяжем одну систему отсчёта для определённости с Землёй, а другую с вагоном, который движется относительно Земли равномерно и прямолинейно со скоростью v. Для простоты рассуждений направим одну из осей координат (например, ось абсцисс) вдоль направления движения вагона (рис. 1.26). Из рисунка видно, что аппликаты и ординаты точки K в обеих системах координат совпадают: $z' = z$ и $y' = y$. Абсциссы же различаются на отрезок $OO' = vt$.

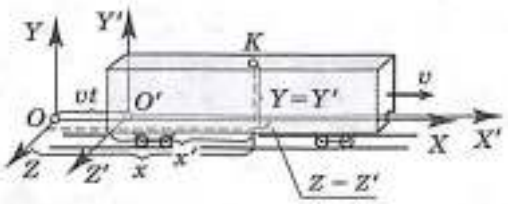


Рис. 1.26

ЗАПОМНИТЕ Преобразования координат

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z$$

называются **преобразованиями Галилея**.

Чтобы убедиться, что преобразования Галилея удовлетворяют принципу относительности, рассмотрим, каков будет их вид, если вагон считать неподвижным, а Землю — перемещающейся в обратном направлении со скоростью V. Абсолютные величины скоростей V и v совпадают, направления же

их противоположны; следовательно, $V = -v$. Рассуждения, совершенно аналогичные вышеизложенным, приводят к формулам

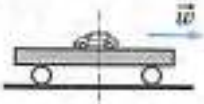
$$z = z',\ y = y',\ x = x' + vt.$$

Итак, преобразования Галилея взаимны.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Любая из инерциальных систем отсчёта может быть условно принята за неподвижную, а преобразования к любой другой инерциальной системе производятся по тем же формулам, но с учётом знака относительной скорости системы. А это и означает, что данные преобразования согласуются с принципом относительности.

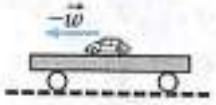
Неинерциальные системы отсчёта*. В инерциальных системах отсчёта ускорение тела согласно ньютоновской механике представляет собой результат его взаимодействия с другими телами, иначе говоря, результат действия сил.

Но существуют системы отсчёта, в которых наблюдается ускоренное движение тел без воздействия на них каких-либо тел. Рассмотрим простой пример. В неподвижном вагоне поезда на гладком столе стоит игрушечный автомобиль (рис. 1.27). При начале движения вагона вправо с ускорением $\vec{w}$ игрушка своего положения относительно рельсов не изменит, если действием сил трения можно пренебречь. Относительно столика в вагоне игрушка будет катиться влево с ускорением $-\vec{w}$, равным по модулю ускорению самого вагона относительно рельсов, но направленным противоположно (рис. 1.28). С точки зрения наблюдателя, находящегося в вагоне, второй и третий законы динамики нарушились, так как ускорение игрушки возникло при отсутствии сил, действующих на эту модель.



Система отсчёта «рельсы»

Рис. 1.27



Система отсчёта «вагон»

Рис. 1.28

ЗАПОМНИТЕ Системы отсчёта, в которых наблюдается ускоренное движение тел при отсутствии действия на них сил со стороны других тел, называются **неинерциальными системами отсчёта**.

Причиной неинерциальности систем отсчёта является ускоренное движение этих систем отсчёта относительно инерциальной системы.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Движение тел в неинерциальных системах отсчёта можно описывать таким образом, как будто и в этих системах отсчёта выполняется второй закон Ньютона, если формально считать, что здесь, кроме реальных сил взаимодействия, существуют ещё и так называемые силы инерции.

Чтобы получить выражение для силы инерции, надо ускорение, с которым движется система отсчёта, взятое с противоположным знаком, умножить на массу ускоряемого тела:

$$\vec{F}_{\text{ин}} = -m\vec{w}.$$

Для рассмотренного выше примера можно сказать, что на модель автомобиля подействовала сила инерции $\vec{F}_{ин}$ (рис. 1.29):

$$\vec{F}_{ин} = -m\vec{w}.$$

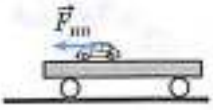


Рис. 1.29

Введение сил инерции даёт формальную возможность не отказываться от второго закона Ньютона и в неинерциальных системах отсчёта. Каждый раз, когда речь идёт о действующих на тело силах, нужно, кроме различных сил, обусловленных взаимодействием тел, рассматривать также и силы инерции.

ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА Второй закон Ньютона будет выглядеть так:

$$\Sigma\vec{F} + \vec{F}_{ин} = m\vec{a}, \qquad (11.1)$$

где $\vec{a}$ — ускорение тела относительно неинерциальной системы отсчёта; $\Sigma\vec{F}$ — сумма реальных сил, действующих на тело.

Например, рассматривая тело массой m в системе отсчёта «лифт», движущейся с ускорением $\vec{w}$, направленным вертикально вверх, кроме силы тяжести $m\vec{g}$ и силы реакции опоры $\vec{N}$, следует ввести силу инерции $\vec{F}_{ин} = -m\vec{w}$ (рис. 1.30, *а*).

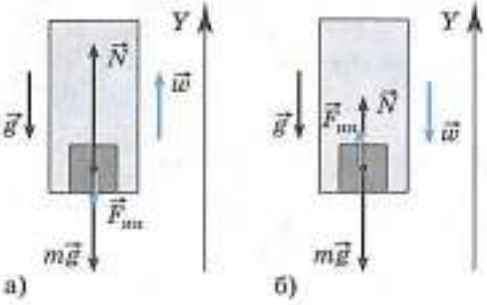


Рис. 1.30

На основе выражения (11.1) с учётом того, что тело покоится относительно лифта, получим

$$m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{ин} = 0,$$

или в проекции на вертикальную ось Y

$$N - mg - mw = 0,$$

откуда

$$N = m(g + w).$$

В случае движения лифта с ускорением $\vec{w}$, направленным вертикально вниз, получим (рис. 1.30, *б*)

$$m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{ин} = 0,$$

или

$$N - mg + mw = 0.$$

Тогда

$$N = m(g - w).$$

Рассматривая движение тел относительно поверхности Земли, необходимо учитывать, что Земля вращается вокруг своей оси и все точки её поверхности имеют центростремительное ускорение $w = \omega^2 r$, где r — расстояние от данной точки до оси вращения. Следовательно, Земля является неинерциальной системой отсчёта, и только малость центростремительного ускорения ($w_{max} = 0{,}034$ м/с^2) по сравнению с ускорением свободного падения на Земле позволяет при решении ряда задач считать Землю инерциальной системой отсчёта.

Однако при объяснении, например, понятия веса тела неинерциальностью Земли пренебречь нельзя. Если бы Земля не вращалась, то на тело действовала бы только сила тяготения $\vec{F}_{тяг}$. Вес тела $\vec{P}$, измеренный по действию тела на опору, был бы равен по модулю силе тяготения $\vec{F}_{тяг}$ и направлен к центру Земли. Однако Земля вращается, и в системе отсчёта, связанной с Землёй, на тело действует сила инерции, направленная от оси вращения перпендикулярно ей:

$$\vec{F}_{ин} = -m\vec{a} = m\omega^2\vec{r}.$$

В результате сила $\vec{F}$, действующая на тело, оказывается равной не силе тяготения $\vec{F}_{тяг}$, а равнодействующей сил $\vec{F}_{тяг}$ и $\vec{F}_{ин}$ (рис. 1.31).

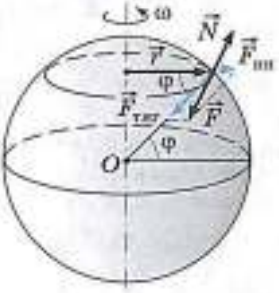


Рис. 1.31

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Силу $\vec{P}$, равную силе $\vec{F}$, но приложенную к опоре, называют *весом тела*.

Из рисунка видно, что сила $\vec{P}$ на любой широте φ, отличной от 0 и 90°, не направлена к центру Земли.

Сила инерции, действующая во вращающейся системе отсчёта на неподвижные в этой системе тела, по модулю равна:

$$F_{ин} = m\omega^2 r = m\omega^2 R\cos\varphi,$$

где $r = R\cos\varphi$ — расстояние от тела до оси вращения; φ — широта местности. Это расстояние на различных широтах разное. На экваторе оно наибольшее, на полюсе равно нулю. Поэтому на различных широтах сила $F_{ин}$, а значит, и вес тела P имеют различные значения. В этом можно убедиться, измеряя действие тела на опору или подвес на различных широтах Земли. Заметим, что эта разница невелика: она меньше или равна (на экваторе) 0,34%.

Инерциальная и неинерциальная системы отсчёта

? 1. Как формулируется классический принцип относительности? 2. В каких системах отсчёта справедлив этот принцип? 3. Почему необходима оговорка, что явления протекают одинаково при одинаковых начальных условиях? 4. Какие системы отсчёта называют неинерциальными? 5. Почему при решении многих практических задач Землю можно считать инерциальной системой отсчёта? 6. В каких системах отсчёта вводят понятие о силах инерции?

РЕШИТЕ 11.1. При каком движении самолёта в нём возникает состояние невесомости?

11.2. Считая Землю шаром радиусом $6{,}4 \cdot 10^6$ м, определите изменение веса тела массой 2 кг при перемещении его с полюса на экватор.

11.3. Тело массой 1 кг, подвешенное на нити длиной 1 м, описывает в горизонтальной плоскости окружность с частотой 1 $с^{-1}$. Определите модуль силы упругости нити $\vec{F}_{упр}$ и угол α, который образует нить с вертикалью.

11.4. Считая Землю шаром радиусом $6{,}4 \cdot 10^6$ м, определите угол отклонения отвеса от направления на центр Земли на широте 45°.

11.5. При какой продолжительности суток на Земле вес тела на экваторе был бы равен нулю?

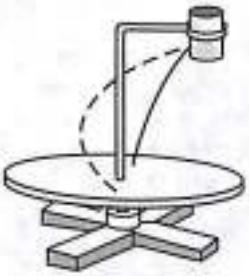
11.6. Мотоциклист, участвуя в аттракционе «гонки на мотоциклах по вертикальной стене», развивает скорость 60 км/ч. Определите угол наклона мотоцикла к стене, если радиус закругления стены аттракциона 7 м.

11.7*[1]. Какую форму имеет поверхность жидкости во вращающемся цилиндрическом сосуде?

1. В некоторых высотных домах установлены скоростные лифты. Что вы ощущаете при подъёме и спуске в таком лифте? Отметьте своё состояние в начале, середине и конце пути. Свяжите свои ощущения с изменением веса вашего тела.
2. Вспомните, что ощущает пассажир при поездке в транспорте, совершающем резкий поворот. Объясните эти ощущения, используя представление о неинерциальных системах отсчёта.

Подготовьте оборудование и продемонстрируйте опыт, который иллюстрировал бы поведение тел в инерциальной и неинерциальной системах отсчёта. Вы сможете убедиться сами и убедить своих одноклассников в существовании ещё одной силы, называемой *силой Кориолиса*.

Для демонстрации опыта вам, несомненно, понадобится помощь учителя. Заготовьте основные элементы установки: сосуд объёмом примерно 200 мл с небольшим отверстием у дна и держатель сосуда, форма которого показана на рисунке.



Полученное устройство поместите на диск вращения, который имеется в каждом кабинете физики.

Прежде всего посмотрите, какой будет форма струи воды в случае, если диск неподвижен. А затем убедитесь, что форма струи существенно изменится, если диск будет вращаться с некоторой скоростью.

Попробуйте найти в природе примеры проявления обнаруженной вами силы. Сделайте об этих явлениях краткое сообщение.

[1] Задания, отмеченные звёздочкой, повышенной сложности.

§ 12. Вращательное движение тел

Повторите: особенности движения тела по окружности, нормальное (центростремительное) ускорение.

Кинематика вращательного движения.

ЗАПОМНИТЕ **Вращательным движением** называется такое движение тела, при котором все его точки движутся по окружностям, центры которых лежат на одной прямой, называемой осью вращения, а плоскости окружностей перпендикулярны оси вращения.

Вращается вокруг своей оси планета Земля, вследствие чего происходит смена дня и ночи, вращаются роторы турбин, шестерни и валы во всевозможных станках и машинах. Вращательным является движение диска проигрывателя, лопастей вентилятора.

Сложные движения можно рассматривать как сочетания поступательного и вращательного движений. Движение колеса автомобиля, например, складывается из вращения колеса вокруг своей оси и поступательного движения оси относительно дороги.

В § 7 было введено понятие угловой скорости при равномерном движении тела по окружности. Это определение можно обобщить на случай неравномерного движения аналогично тому, как было введено понятие о мгновенной скорости материальной точки:

$$\omega = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}.$$

ЗАПОМНИТЕ Если тело за любые равные промежутки времени поворачивается на одинаковые углы, то такое движение называют **равномерным вращательным движением**.

Используя понятие угловой скорости, можно дать ещё одно определение равномерного вращательного движения.

ЗАПОМНИТЕ **Равномерным вращательным движением** называют движение с постоянной угловой скоростью (ω = const).

Примером вращательного движения, близкого к равномерному, может служить вращение Земли вокруг своей оси.

Равномерное вращательное движение встречается сравнительно редко. Гораздо чаще приходится иметь дело с вращательным движением, при котором угловая скорость с течением времени изменяется. С примерами неравномерного вращательного движения мы встречаемся повседневно. На разных участках пути с неодинаковой угловой скоростью вращаются колёса велосипедов, мотоциклов, автомобилей.

Изменение угловой скорости со временем характеризуется векторной величиной — *угловым ускорением*.

ЗАПОМНИТЕ **Угловым ускорением** ε называется предел отношения изменения угловой скорости $\Delta\omega$ к изменению времени Δt при условии $\Delta t \to 0$:

$$\varepsilon = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t}.$$

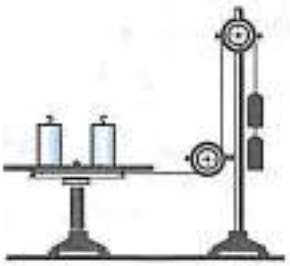


Рис. 1.32

Основной закон динамики вращательного движения. Закон динамики вращательного движения может быть получен опытным путём. Для этого можно воспользоваться прибором, внешний вид которого представлен на рисунке 1.32. Металлический диск укреплён на вертикальной оси с помощью шарикоподшипника. Силы трения, возникающие в подшипнике при вращении диска, настолько малы, что их влиянием на результат эксперимента можно пренебречь. Диск приводят во вращение с помощью намотанной на шкив нити, перебрасывая её через блок и подвешивая к её концу груз. Перемещение груза вниз под действием силы тяжести приводит диск во вращение.

Если начальная угловая скорость вращения диска равна нулю $\omega_0 = 0$, то её значение ω_t при вращении с постоянным угловым ускорением в любой момент времени t определяется выражением

$$\omega_t = \varepsilon t.$$

Измерив время t падения груза и максимальную угловую скорость ω_t, которую приобретает диск за это время, можно определить угловое ускорение по формуле

$$\varepsilon = \frac{\omega_t}{t},$$

Исследование зависимости углового ускорения вращения диска от модуля приложенной силы F при постоянном плече d силы относительно данной оси вращения показывает, что при увеличении силы в 2, 3, 4 раза и т. д. угловое ускорение ε увеличивается соответственно во столько же раз. Следовательно, угловое ускорение вращающегося тела прямо пропорционально модулю приложенной силы при постоянном плече d этой силы.

Под диском в приборе установлены два шкива с разными радиусами. Намотав нить на шкив, имеющий в два раза больший радиус, и выполнив измерения, можно увидеть, что увеличение плеча силы в два раза при постоянной по модулю приложенной силе приводит к увеличению углового ускорения диска также в два раза.

Так как угловое ускорение прямо пропорционально силе F при постоянном значении плеча d силы и плечу силы относительно данной оси вращения при постоянном значении приложенной силы F, то очевидно, что оно пропорционально их произведению, т. е. *моменту силы* $M = Fd$:

$$\varepsilon = kM,$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Если провести описанные опыты с другими телами, то зависимость углового ускорения их вращения от момента приложенных сил будет точно такой

же по форме, но коэффициент пропорциональности k будет иметь другое значение. Следовательно, угловое ускорение зависит ещё от свойств вращающегося тела.

ЗАПОМНИТЕ Величина I, зависящая от массы вращающегося тела и от расположения частей тела относительно оси вращения, называется **моментом инерции** вращающегося тела относительно данной оси вращения:

$$I = \frac{1}{k} = \frac{M}{\varepsilon}. \qquad (12.1)$$

Результаты экспериментов по исследованию вращательного движения можно записать в виде

$$\varepsilon = \frac{M}{I}. \qquad (12.2)$$

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА Угловое ускорение ε вращающегося тела прямо пропорционально сумме моментов M всех приложенных к нему сил относительно оси вращения тела и обратно пропорционально моменту инерции I тела относительно этой оси вращения.

Полученное уравнение аналогично по форме записи выражению второго закона Ньютона для поступательного движения тела. Ускорению $\vec{a}$ поступательного движения тела соответствует угловое ускорение ε вращательного движения, аналогом силы F при поступательном движении является момент силы M во вращательном движении, а аналогом массы m тела при поступательном движении служит момент инерции I тела во вращательном движении.

Вычисление момента инерции. Момент инерции тела сравнительно простой формы может быть определён путём вычислений.

Рассмотрим простейший случай — вращение тела по окружности в случае, когда размеры тела пренебрежимо малы по сравнению с радиусом окружности.

Если к телу, закреплённому на расстоянии R от неподвижной оси, приложена сила F, направленная перпендикулярно связи и оси вращения, то тело приобретает тангенциальное ускорение:

$$a_\tau = \frac{F}{m}, \qquad (12.3)$$

так как за очень малый промежуток времени Δt движение тела по окружности можно считать прямолинейным.

Рассматривая движение тела как вращательное, угловое ускорение его движения можно определить из основного уравнения динамики вращательного движения (см. уравнение (12.2)).

Из уравнения (12.2), учитывая уравнение (12.3), получим выражение для момента инерции тела: $I = \frac{M}{\varepsilon} = \frac{FR}{\varepsilon} = \frac{ma_\tau R}{\varepsilon}$. Так как $a_\tau = \frac{\Delta v_\text{л}}{\Delta t}$, а $v_\text{л} = \omega R$, то $a_\tau = \frac{\Delta \omega R}{\Delta t} = \varepsilon R$.

Отсюда получим

$$I = \frac{ma_\tau R}{\varepsilon} = \frac{m\varepsilon R^2}{\varepsilon} = mR^2. \qquad (12.4)$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Момент инерции тела, вращающегося по окружности радиусом R, бо́льшим по сравнению с размерами тела, равен произведению массы тела на квадрат расстояния от него до оси вращения.

По этой формуле можно, например, вычислить момент инерции планеты относительно оси вращения, проходящей через Солнце и перпендикулярной плоскости орбиты планеты.

Полученный результат (см. формулу (12.4)) позволяет решить задачу о нахождении момента инерции тела произвольной формы относительно любой оси вращения. Для этого необходимо мысленно разбить тело на очень малые части, найти произведение массы каждой части на квадрат расстояния от неё до оси вращения и все эти произведения сложить. Эту операцию можно произвести сравнительно просто для таких тел, как обруч, тонкостенный цилиндр и т. д. Все точки обруча находятся на одинаковом расстоянии от оси вращения, проходящей через его центр перпендикулярно плоскости обруча. Момент инерции любой точки на обруче относительно этой оси равен mr^2. Момент инерции обруча, равный сумме моментов инерции каждой его точки, определится выражением

$$I = m_1r^2 + m_2r^2 + m_3r^2 + \ldots = r^2(m_1 + m_2 + m_3 + \ldots) = Mr^2,$$

где $M = m_1 + m_2 + m_3 + \ldots$ — масса обруча.

Различные точки шара, цилиндра и других тел находятся на разных расстояниях от оси вращения, поэтому расчёт момента инерции таких тел более сложен и производится методом высшей математики, называемым интегрированием.

В таблице 1 приведены формулы для вычисления моментов инерции некоторых тел относительно оси, проходящей через центр масс этих тел. (Понятие «центр масс» будет подробно рассмотрено в § 13.)

Таблица 1

Тело	Место прохождения оси вращения	Момент инерции I_0
Обруч	Через центр обруча перпендикулярно плоскости обруча	mR^2
Диск (цилиндр)	Через центр диска перпендикулярно плоскости диска	$\frac{1}{2}mR^2$
Диск	Через центр диска вдоль его диаметра	$\frac{1}{4}mR^2$
Шар	Через центр шара	$\frac{2}{5}mR^2$
Стержень длиной l	Через середину тонкого стержня перпендикулярно ему	$\frac{1}{12}ml^2$

Момент инерции тела произвольной формы можно определить опытным путём. Для этого нужно измерить угловое ускорение вращения тела при известном моменте приложенной силы и вычислить момент инерции тела относительно заданной оси вращения, используя уравнение (12.1).

Единица момента инерции. Из уравнения (12.1) можно получить единицу момента инерции в СИ — килограмм на метр в квадрате (кг · м^2).

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Тело имеет момент инерции, равный 1 кг · м^2, если под действием момента силы 1 Н · м приобретает угловое ускорение 1 рад/с^2.

Момент инерции тела человека, стоящего с прижатыми к туловищу руками относительно вертикальной оси, проходящей через его центр масс, равен примерно 1,2 кг · м^2. Вытянув в стороны руки и расставив ноги, человек увеличивает свой момент инерции относительно той же оси почти в семь раз.

Теорема Штейнера*. Для разных осей вращения момент инерции одного и того же тела различен.

Если известен момент инерции I_0 относительно любой оси, проходящей через центр масс тела, то для расчёта момента инерции I этого тела относительно другой оси, параллельной первой и отстоящей от неё на расстоянии d, используется соотношение, известное как *теорема Штейнера* (см. задачу 1):

$$I = I_0 + md^2.$$

Вращательное движение. Угловая скорость. Угловое ускорение

1. Что называется угловой скоростью? 2. Как связаны между собой линейная и угловая скорости? 3. Что называется угловым ускорением? 4. Как формулируется основное уравнение динамики вращательного движения? 5. Какие вам известны примеры использования вращательного движения в технике? 6. Почему, говоря о значении момента инерции тела, надо обязательно указывать, относительно какой оси он определяется?

ЗАДАЧА 1*. Докажите теорему Штейнера для системы, состоящей из двух материальных точек, вращающихся вокруг оси, перпендикулярной прямой, соединяющей эти точки.

Решение. Рассмотрим систему, состоящую из двух материальных точек *1* и *2* массами m_1 и m_2. Относительно оси вращения, проходящей через центр масс такой системы перпендикулярно прямой, соединяющей точки, момент инерции системы равен:

$$I_0 = m_1r_1^2 + m_2r_2^2, \qquad (1)$$

где r_1 и r_2 — соответственно расстояния от точек *1* и *2* до центра масс системы (рис. 1.33). Момент инерции этой же системы относительно оси, проходящей параллельно первой, но смещённой на расстояние d, равен:

$$I = m_1(r_1 + d)^2 + m_2(r_2 - d)^2. \qquad (2)$$

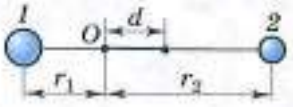


Рис. 1.33

Произведя преобразования, получим

$$I = (m_1r_1^2 + m_2r_2^2) + (m_1 + m_2)d^2 + 2d(m_1r_1 - m_2r_2). \qquad (3)$$

Так как точка O является центром масс системы материальных точек, то согласно определению центра масс выполняется соотношение

$$m_1 r_1 = m_2 r_2. \qquad (4)$$

Подставляя выражения (1) и (4) в формулу (3), получаем $I = I_0 + (m_1 + m_2)d^2$, что и требовалось доказать.

ЗАДАЧА 2. Вследствие действия приливов, вызванных притяжением Луны и Солнца, продолжительность суток на Земле увеличивается за $\Delta t = 100$ лет на $\Delta T = 0{,}001$ с. Определите приливную силу трения. Землю можно считать однородным шаром массой $6 \cdot 10^{24}$ кг и радиусом $6{,}4 \cdot 10^6$ м.

Решение. Из основного уравнения динамики вращательного движения следует, что момент силы трения $M_{тр} = I\varepsilon$.

Момент инерции Земли $I = 0{,}4mR^2$. Изменение угловой скорости Земли $\Delta\omega = \frac{2\pi}{T} - \frac{2\pi}{T + \Delta T} \approx \frac{2\pi\Delta T}{T^2}$, а угловое ускорение $\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{2\pi\Delta T}{T^2\Delta t}$, где $\Delta t = 100$ лет $= 100 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600$ с. Представим упрощённо действие приливной волны как действие приливной силы трения $F_{тр}$, приложенной перпендикулярно радиусу Земли на экваторе. Момент приливной силы трения равен:

$$M_{тр} = F_{тр}R.$$

Подставив значения момента инерции Земли I, углового ускорения и момента приливной силы трения $M_{тр}$ в основное уравнение динамики вращательного движения, получим $0{,}4mR^2\frac{2\pi\Delta T}{T^2\Delta t} = F_{тр}R$.

Отсюда $F_{тр} = \frac{0{,}8\pi mR\Delta T}{T^2\Delta t}$.

Проведя вычисления, найдём:

$$F_{тр} = \frac{0{,}8 \cdot 3{,}14 \cdot 6 \cdot 10^{24} \cdot 6{,}4 \cdot 10^6 \cdot 0{,}001}{(24 \cdot 3600)^2 \cdot 100 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600}\ (\text{Н}) \approx 4 \cdot 10^9\ \text{Н}.$$

ЗАДАЧА 3. Цилиндр скатывается без проскальзывания с наклонной плоскости с углом при основании α. Рассчитайте ускорение центра масс цилиндра.

Решение. На цилиндр действуют сила тяжести $m\vec{g}$, сила нормальной реакции опоры $\vec{N}$ и сила трения $\vec{F}_{тр}$ (рис. 1.34). Запишем уравнение второго закона Ньютона в проекциях на ось X и основное уравнение вращательного движения цилиндра относительно его центра масс: $ma = mg\sin\alpha - F_{тр}$, $I\varepsilon = M$.

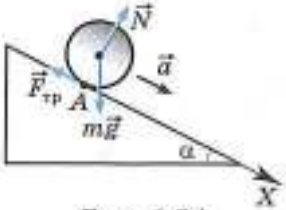


Рис. 1.34

Для сплошного цилиндра $I = mr^2/2$, а угловое ускорение $\varepsilon = a/r$. Итак, $ma = mg\sin\alpha - F_{тр}$, $\frac{mr^2}{2} \cdot \frac{a}{r} = F_{тр}r$.

Отсюда $a = \frac{2}{3}g\sin\alpha$.

Решение задачи упрощается, если записать уравнение вращательного движения относительно точки A,

используя теорему Штейнера: $(I_0 + mr^2)\frac{a}{r} = mgr\sin\alpha$, откуда сразу следует, что $a = \frac{2}{3}g\sin\alpha$.

РЕШИТЕ

12.1°. Определите моменты инерции цилиндра массой m, радиусом R и длиной l относительно: а) оси цилиндра; б) образующей цилиндра; в) оси, перпендикулярной оси цилиндра и проходящей через край цилиндра (цилиндр очень тонкий).

12.2. На барабан радиусом $R = 0{,}5$ м с горизонтальной осью вращения намотан шнур, к концу которого привязан груз массой $m = 10$ кг. Определите момент инерции барабана, если известно, что его угловое ускорение $\varepsilon = 2$ рад/с^2. Трение не учитывайте.

12.3. К ободу однородного диска радиусом $R = 0{,}2$ м и массой 1,2 кг приложена постоянная сила 100 Н. При вращении на диск действует момент силы трения, равный 5 Н · м. Чему равно угловое ускорение диска?

12.4. Через неподвижный блок, представляющий собой диск массой m_0, перекинута невесомая и нерастяжимая нить, к концам которой подвешены два груза массами m_1 и m_2. Чему равны модули ускорения грузов и сил натяжения нити?

12.5. Цилиндрический маховик массой m и радиусом R вращается с угловой скоростью ω. С какой силой нужно прижать к маховику тормозную колодку, чтобы он остановился через промежуток времени, равный t? Коэффициент трения между колодкой и маховиком равен μ.

12.6*. Мальчик бросает обруч радиусом R в горизонтальном направлении со скоростью v, одновременно сообщая ему вращение в обратную сторону с угловой скоростью ω. При каком соотношении между заданными величинами обруч покатится обратно к мальчику?

Исследуйте зависимость скорости вращения диска от его момента инерции. Возьмите два CD (старых) и четыре примерно одинаковых шарика из пластилина. Склейте оба диска пластилином, расположив шарики симметрично относительно оси дисков.

Получившееся «колесо» поместите на наклонную плоскость, длина которой должна быть не менее 1 м, и зафиксируйте время его скатывания.

Затем измените положение кусочков пластилина относительно центра дисков, по-прежнему соблюдая симметрию, и повторите опыт ещё 2—3 раза.

Представьте теоретическое доказательство справедливости полученных результатов.

§ 13. Условия равновесия тел

Повторите: сложение сил, условия равновесия тел.

ЗАПОМНИТЕ Раздел механики, в котором изучаются условия равновесия твёрдых тел, называется **статикой**.

Знание условий равновесия твёрдых тел важно для расчётов машин и механизмов, транспортных средств и различных сооружений.

В статике твёрдое тело рассматривается как абсолютно твёрдое, т. е. недеформируемое, тело. Фактически это означает, что деформация много меньше первоначальных размеров тела, так что ею можно пренебречь. Такая модель, как и любая другая, применима лишь в определённых границах.

Условия равновесия твёрдого тела можно получить как следствия законов динамики поступательного и вращательного движений твёрдого тела. Первое условие равновесия является следствием второго закона Ньютона:

$$\Sigma\vec{F} = m\vec{a},$$

где $\Sigma\vec{F}$ — векторная сумма сил, действующих на тело. Из этого закона следует, что при выполнении условия

$$\Sigma\vec{F} = 0 \qquad (13.1)$$

и при равенстве начальной скорости нулю ($\upsilon_0 = 0$) тело не будет перемещаться в данной системе отсчёта.

Условие (13.1) — необходимое условие равновесия твёрдого тела, но недостаточное, так как твёрдое тело может не только двигаться поступательно, но и вращаться.

Второе условие равновесия твёрдого тела получается из основного уравнения динамики вращательного движения твёрдого тела:

$$\Sigma\vec{M} = I\vec{\varepsilon},$$

где $\Sigma\vec{M}$ — векторная сумма моментов сил, действующих на твёрдое тело.

Из этого уравнения следует, что при выполнении равенства $\Sigma\vec{M} = 0$ и при нулевой начальной угловой скорости ($\omega_0 = 0$) твёрдое тело вращаться не будет. Таким образом,

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ для того чтобы твёрдое тело находилось в равновесии и состоянии покоя, необходимо и достаточно выполнение следующих условий: векторные суммы действующих сил и моментов сил относительно любой оси должны быть равны нулю (при равенстве нулю начальной скорости υ_0 поступательного движения и равенстве нулю начальной скорости ω_0 вращательного движения).

Всё сказанное выше справедливо для инерциальных систем отсчёта. В неинерциальных системах отсчёта условия равновесия составляются таким же образом, но к действующим на тело силам добавляют силы инерции.

Полученные выше условия равновесия твёрдого тела позволяют определить силы реакции, действующие на тело со стороны других тел.

Пара сил.

ЗАПОМНИТЕ Система двух равных по модулю и антипараллельных сил $\vec{F}$ и $-\vec{F}$, линии действия которых не совпадают (рис. 1.35), называется **парой сил**.

Модуль момента сил такой пары относительно любой точки

$$M = Fd,$$

где d — кратчайшее расстояние между линиями действия сил.

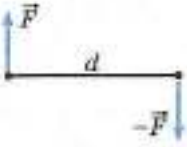


Рис. 1.35

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Пару сил нельзя заменить одной равнодействующей силой, иными словами, пара сил не имеет равнодействующей.

Центр тяжести и центр масс.

ЗАПОМНИТЕ **Центром тяжести** тела называют точку, через которую при любом положении тела в пространстве проходит равнодействующая сил тяжести, действующих на все частицы тела.

Из этого определения следует простой способ нахождения центров тяжести плоских фигур. Если такую фигуру подвешивать на нити последовательно за разные точки, то направления, отмеченные нитью отвеса, пересекутся в одной точке — центре тяжести тела.

Точка O, в которой находится центр тяжести тела в однородном поле силы тяжести, обладает ещё одним замечательным свойством.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Если к свободному телу массой m приложена сила $\vec{F}$, проходящая через эту точку, то тело движется поступательно и ускорение $\vec{a}$ любой точки тела равно:

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

Как показывает опыт, в любом теле имеется только одна точка O, через которую проходят линии приложения всех сил, вызывающих поступательное движение тела. Если же вектор силы $\vec{F}$ не проходит через точку O, то тело перемещается в пространстве и вращается вокруг оси, проходящей через эту точку. При этом ускорение $\vec{a}$ точки O определяется по второму закону Ньютона так же, как и в первом случае, а ускорения всех остальных точек можно найти только с учётом вращения тела.

ЗАПОМНИТЕ Точку, которая всегда движется так, как будто в ней сосредоточена вся масса тела, называют **центром масс** тела.

Если вектор силы $\vec{F}$ не проходит через центр масс тела, то, кроме движения центра масс с ускорением $\vec{a}$, происходит вращение тела с угловым ускорением $\vec{\varepsilon}$ вокруг оси, проходящей через центр масс и перпендикулярной плоскости, проходящей через вектор $\vec{F}$ и центр масс.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Угловое ускорение ε вращения тела определяется основным уравнением динамики вращательного движения:

$$\varepsilon = \frac{M}{I},$$

где M — момент силы F относительно оси вращения тела; I — момент инерции тела относительно этой оси.

Понятие о центре масс имеет смысл для любой механической системы и не связано ни с каким силовым полем, а понятие центра тяжести связано с действием на систему гравитационного поля.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ В однородном гравитационном поле положение центра тяжести любой системы тел совпадает с положением её центра масс.

С помощью понятия «центр масс» можно обобщить первый закон Ньютона — закон инерции.

ЗАКОН ИНЕРЦИИ Если на замкнутую систему тел не действуют внешние силы, то центр масс этой системы движется равномерно и прямолинейно.

Следовательно, центр масс замкнутой системы тел движется с постоянной скоростью. Если же в начальный момент времени суммарный импульс системы был равен нулю, то положение центра масс данной системы тел не изменяется, какие бы изменения в расположении тел ни происходили. Этот факт позволяет решать многие задачи, не прибегая к закону сохранения импульса.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Центр масс в общем случае может не совпадать ни с одним из тел замкнутой системы.

В частном случае, когда система состоит из двух тел, центр масс лежит на прямой, соединяющей эти тела, и делит расстояния между ними в отношении, обратном отношению масс.

Вращательное движение. Момент сил. Устойчивое и неустойчивое равновесие

1. Сформулируйте условия равновесия твёрдого тела. 2. Какая точка называется центром тяжести? 3. Как можно определить координаты центра тяжести тела? 4. Какая точка называется центром масс тела? 5. Как можно экспериментально определить положение центра масс твёрдого тела? 6. В каких случаях центр масс и центр тяжести тела совпадают?

ЗАДАЧА 1. Два человека одинакового роста держат на плечах за концы в горизонтальном положении трубу длиной 2 м и массой 10 кг. На расстоянии 0,5 м от первого человека к трубе подвешен груз массой 100 кг. Определите силы, с которыми труба давит на плечи первого и второго человека. Можно ли по данным задачи рассчитать силы давления трубы, если её будут нести не два, а три человека?

Решение. В рассматриваемой задаче все векторы сил параллельны оси ординат, поэтому уравнения равновесия имеют вид $\Sigma F_y = 0$, $\Sigma M = 0$.

Выбрав ось, проходящую через точку A (рис. 1.36), запишем условия равновесия:

$$N_1 + N_2 - m_1g - m_2g = 0,$$

$$m_2gAC + m_1gAO - N_2AB = 0$$

(здесь N_1 и N_2 — силы, действующие на трубу).

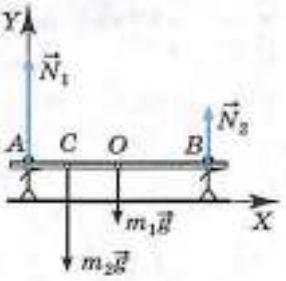


Рис. 1.36

Отсюда найдём: $N_2 = \dfrac{m_2gAC + m_1gAO}{AB}$.

Полагая $g = 10$ м/с^2, получаем $N_2 = 300$ Н, $N_1 = (m_1 + m_2)g - N_2 = 800$ Н.

Чтобы проверить полученный ответ, определим модуль силы N_1, применив правило моментов относительно точки B:

$$N_1AB - m_2gBC - m_1gOB = 0,$$

$$N_1 = \frac{m_2gBC + m_1gOB}{AB} = 800 \text{ Н}.$$

В соответствии с третьим законом Ньютона труба давит на плечи с силами $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, равными по модулю, но противоположно направленными силам $\vec{N}_1$ и $\vec{N}_2$. Следовательно, $F_1 = 800$ Н, $F_2 = 300$ Н.

Для случая, когда трубу несут три человека, независимых уравнений получается два, а неизвестных сил реакции опор — три. Расчёт трёх сил в рамках модели «труба — абсолютно твёрдое тело» невыполним.

ЗАДАЧА 2. Балка длиной l и массой 120 кг висит на трёх шнурах одинаковой жёсткости (как показано на рисунке 1.37, *а*). Центр масс балки отстоит от первого шнура на расстоянии $l/4$. Определите силы натяжения шнуров.

Решение. На балку действуют сила тяжести $m\vec{g}$ и силы натяжения нитей $\vec{N}_1$, $\vec{N}_2$, $\vec{N}_3$ (рис. 1.37, *а*). Поскольку все эти силы параллельны, уравнений равновесия только два:

$$N_1 + N_2 + N_3 - mg = 0 \qquad (1)$$

и

$$N_2\frac{l}{2} + N_3l - mg\frac{l}{4} = 0 \qquad (2)$$

(относительно оси, проходящей через левый конец балки).

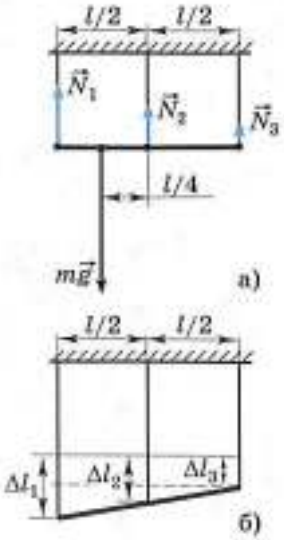


Рис. 1.37

Так как общее число сил реакции больше числа уравнений, содержащих эти силы, то данная система является статически неопределимой. В этом случае модель абсолютно твёрдого тела оказывается непригодной и при решении задачи необходимо учитывать деформацию тел, применив закон Гука.

Обозначив растяжения шнуров Δl_1, Δl_2, Δl_3 и используя закон Гука, получим

$$N_1 = k\Delta l_1,\ N_2 = k\Delta l_2,\ N_3 = k\Delta l_3. \qquad (3)$$

Из подобия трапеций (рис. 1.37, *б*) получим третье условие равновесия:

$$\frac{\Delta l_1 - \Delta l_3}{\Delta l_2 - \Delta l_3} = \frac{l}{l/2} = 2. \quad (4)$$

Из выражений (3) и (4) следует:

$$N_1 + N_3 = 2N_2. \quad (5)$$

Решая уравнения (1) — (5), получаем

$$N_1 = \frac{7}{12}mg = 700 \text{ Н}, \; N_2 = \frac{mg}{3} = 400 \text{ Н}, \; N_3 = \frac{mg}{12} = 100 \text{ Н}.$$

РЕШИТЕ

13.1. Балка длиной 8 м и массой 100 кг расположена горизонтально и покоится на двух опорах. Известно, что $AM = 3$ м, $MN = 3$ м, $NB = 2$ м. На расстоянии 2 м от левого конца балки подвешен груз массой 40 кг. Определите силы, с которыми балка давит на опоры (рис. 1.38).

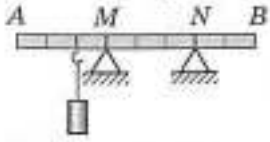


Рис. 1.38

13.2. Однородный стержень массой 0,1 кг укреплён одним концом в шарнире и удерживается в равновесии с помощью нити, прикреплённой к другому его концу. Угол α между стержнем и вертикальным направлением равен 30°. Определите силы натяжения нити и реакции шарнира, если нить расположена горизонтально (рис. 1.39).

13.3. Лестница массой m прислонена к стене. Чему равен минимальный угол φ между лестницей и полом, при котором лестница ещё находится в равновесии, если коэффициент трения между лестницей и стенкой равен μ_1, а между лестницей и полом равен μ_2? Определите силы реакции опоры и силы трения между лестницей, полом и стенкой.

13.4. Цилиндр радиусом R имеет цилиндрическую полость радиусом r, ось которой расположена параллельно оси цилиндра и смещена относительно неё на расстояние l. Цилиндр положили на наклонную плоскость. Определите максимальный угол наклона плоскости, при котором цилиндр ещё не скатывается.

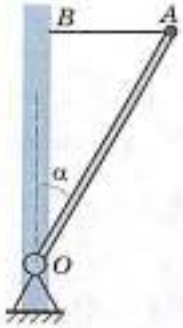


Рис. 1.39

1. Вырежите из плотного картона фигуры разной формы и определите положение их центра масс.

2. Понаблюдайте за поведением канатоходца, объясните «секреты», позволяющие ему находиться в наиболее устойчивом состоянии.

1. Предложите способ определения центра тяжести человека. Для этого можно воспользоваться турником, отвесом и мелом.

2. Продемонстрируйте одноклассникам опыт, который называется «Непослушная катушка». Возьмите катушку с нитками, положите её на горизонтальную поверхность так, чтобы нить проходила горизонтально снизу, и потяните за нить. Обратите внимание, куда покатилась катушка.

Измените угол наклона нити относительно горизонта, увеличив его примерно на 10—15°, и вновь потяните за нить. Далее, увеличивая угол каждый раз на 10—15°, установите, при каком угле наклона нити катушка изменяет направление движения. Дайте объяснение наблюдаемому явлению и представьте теоретическое доказательство.

§ 14. Закон сохранения импульса

Повторите: импульс тела, импульс силы, упругое и неупругое соударения.

Основную задачу механики — определение положения тела в любой момент времени — можно решить с помощью законов Ньютона, если заданы начальные условия и силы, действующие на тело, как функции координат, скоростей и времени. На практике эти зависимости не всегда известны. Однако многие задачи в механике можно решить, не зная значений сил, действующих на тело. Это возможно потому, что существуют величины, характеризующие механическое движение тел, которые сохраняются при определённых условиях.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Если известны положение тела и его скорость в какой-то момент времени, то при помощи сохраняющихся величин можно определить положение и скорость этого тела после любого взаимодействия, не прибегая к законам динамики.

Сохраняющимися величинами в механических процессах являются импульс, момент импульса и энергия.

Импульс тела. Изменение скорости $\vec{v}$ тела под действием постоянной силы $\vec{F}$ за интервал времени Δt равно:

$$\Delta\vec{v} = \vec{a}\Delta t = \frac{\vec{F}\Delta t}{m}. \qquad (14.1)$$

Уравнение (14.1) показывает, что изменение скорости движения тела прямо пропорционально не только силе, но и времени её действия.

ЗАПОМНИТЕ Физическая величина, равная произведению силы $\vec{F}$ на время Δt её действия, называется **импульсом силы**.

Из формулы (14.1) следует, что произведение изменения скорости тела на его массу равно импульсу силы:

$$m\Delta\vec{v} = \vec{F}\Delta t,$$

или

$$\boxed{\Delta(m\vec{v}) = \vec{F}\Delta t.}$$

ЗАПОМНИТЕ Физическая величина, равная произведению массы тела на скорость его движения, называется **импульсом тела**.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Изменение импульса тела равно импульсу силы, вызывающей это изменение.

Иногда импульс тела называют *количеством движения*. Импульс тела обозначается латинской буквой $\vec{p}$:

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

За единицу импульса в Международной системе принят импульс тела массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с.

Закон сохранения импульса. При взаимодействии тел скорость и импульс каждого из них изменяются.

ЗАПОМНИТЕ Система тел, на которые не действуют внешние силы или сумма всех внешних сил равна нулю, называется **замкнутой системой**.

Экспериментально был установлен один из основных фундаментальных законов физики — *закон сохранения импульса.*

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА В любой инерциальной системе отсчёта в замкнутой системе тел сумма векторов импульсов тел до их взаимодействия всегда равна сумме векторов импульсов тел после взаимодействия:

$$\Sigma \vec{p}_i = \text{const}.$$

Постоянство суммы векторов импульсов при любых взаимодействиях тел является универсальным законом природы.

Если сумма векторов импульсов взаимодействующих тел остаётся постоянной, то сумма изменений импульсов взаимодействующих тел равна нулю:

$$\Sigma \Delta \vec{p}_i = 0.$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ К незамкнутым системам тел закон сохранения импульса неприменим, однако постоянными остаются проекции импульса на координатные оси, в направлении которых сумма проекций приложенных внешних сил равна нулю.

В неинерциальных системах отсчёта при отсутствии взаимодействия тел скорости движения тел изменяются со временем. Поэтому импульс любого тела при отсутствии взаимодействия с другими телами не остаётся постоянным, если выбрана неинерциальная система отсчёта. Следовательно, необходимым условием применимости закона сохранения импульса к замкнутой системе взаимодействующих тел является выбор инерциальной системы отсчёта.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ В неинерциальных системах отсчёта закон сохранения импульса не выполняется.



Рис. 1.40

Движение тел переменной массы. Рассмотрим в качестве примера принцип действия реактивного двигателя. При сгорании топлива в камере сгорания ракеты образуются газы, нагретые до высокой температуры. Эти газы вырываются из сопла со скоростью $\vec{u}$ относительно ракеты (рис. 1.40; на рисунке цифрами обозначено: *1* — топливо; *2* — окислитель). Эту скорость называют *скоростью истечения*. Пренебрегая взаимодействием ракеты с внешними телами, будем считать систему тел «ракета — газы» замкнутой.

Пусть в момент времени $t_0 = 0$ ракета массой m двигалась со скоростью $\vec{V}_0$. За малый промежуток времени Δt из ракеты выбрасывается масса газа Δm со скоростью $\vec{u}$ относительно ракеты, т. е. со скоростью $\vec{V}_1 = \vec{u} + \vec{v}$ относительно инерциальной систе-

мы отсчёта (здесь v — скорость ракеты через Δt). По закону сохранения импульса имеем

$$m\vec{V}_0 = (m - \Delta m)\vec{v} + \Delta m\vec{V}_1.$$

Подставив значения $\vec{V}_1 = \vec{u} + \vec{v}$ и $\vec{v} = \vec{V}_0 + \Delta\vec{v}$, получим

$$m\Delta\vec{v} = -\Delta m\vec{u}. \qquad (14.2)$$

Разделим обе части равенства на промежуток времени Δt, в течение которого работали двигатели ракеты:

$$m(\Delta\vec{v}/\Delta t) = -(\Delta m/\Delta t)\vec{u}.$$

Перейдя к пределу при $\Delta t \to 0$ и учитывая, что $\lim\limits_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \vec{a}$ есть ускорение ракеты, а $\lim\limits_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta m}{\Delta t} = \mu$ есть расход топлива в единицу времени, получим

$$m\vec{a} = -\mu\vec{u}.$$

ЗАПОМНИТЕ Произведение массы ракеты m на ускорение её движения $\vec{a}$ называется **реактивной силой тяги**:

$$\vec{F}_р = m\vec{a} = -\mu\vec{u}.$$

Таким образом, мы показали, что модуль реактивной силы тяги $\vec{F}_р$ равен произведению модуля скорости $\vec{u}$ истечения газов относительно ракеты на секундный расход μ топлива.

Реактивная сила тяги действует со стороны истекающих газов на ракету и направлена в сторону, противоположную направлению истечения газов.

Особенности реактивных двигателей*. Реактивные двигатели широко используют в современной технике. Возможность межпланетных полётов с применением ракетных кораблей впервые была доказана К. Э. Циолковским в работе «Исследование мировых пространств реактивными приборами», опубликованной в 1903 г.

Формулу, дающую возможность определить массу топлива, необходимого для сообщения ракете заданной скорости, а также найти максимальную скорость ракеты при заданном запасе топлива, получил К. Э. Циолковский. Для случая движения ракеты без учёта влияния силы тяжести формула Циолковского имеет вид

$$m_0/m = e^{v/u} = 10^{0,4343v/u}, \qquad (14.3)$$

где m_0 — масса ракеты с топливом перед включением двигателя; m — масса ракеты без топлива при окончании работы двигателя; u — скорость истечения газов относительно ракеты; v — скорость ракеты к концу работы двигателя. Символом $e = 2,71826...$ обозначено число, представляющее собой непериодическую бесконечную десятичную дробь, принятую в математике как наиболее удобное основание показательной функции (основание натурального логарифма)[1].

[1] Выражение (14.3) можно получить, проинтегрировав уравнение (14.2), записанное в дифференциальной форме $mdv = -udm$.

Анализ формулы Циолковского приводит к выводу, что расход топлива, необходимого для достижения заданной скорости, определяется скоростью истечения газов относительно ракеты. Так, для достижения ракетой скорости 8000 м/с, которая нужна для запуска искусственного спутника Земли, при скорости истечения газов 1000 м/с отношение массы ракеты с топливом m_0 к массе ракеты без топлива m равно:

$$m_0/m = e^8 = 10^{3,4744} \approx 2981 \approx 3000.$$

Для достижения ракетой этой же скорости при скорости истечения газов 4000 м/с искомое отношение масс равно:

$$m_0/m = e^2 = 10^{0,8686} \approx 7,389 \approx 7,4.$$

Если учесть, что скорость 4000 м/с — это почти максимальное значение скорости истечения газов при использовании энергии химических реакций окисления топлива, то становится ясным, какие серьёзные трудности встают перед конструкторами космических ракет.

К. Э. Циолковский нашёл решение трудной задачи достижения ракетами космических скоростей, предложив использование многоступенчатых ракет.

Импульс. Количество движения. Закон сохранения импульса. Реактивное движение

1. Что называется импульсом тела? 2. Какая система тел называется замкнутой? 3. Как формулируется закон сохранения импульса? 4. Может ли ракетный двигатель разгонять ракету за пределами земной атмосферы? 5. Почему для запуска космических кораблей используются многоступенчатые ракеты?

РЕШИТЕ

14.1. Определите ускорение ракеты массой $m = 10^5$ кг через 1 мин после старта при секундном расходе топлива $\mu = 7,5 \cdot 10^3$ кг/с. Скорость истечения газов относительно ракеты постоянна и равна $u = 2 \cdot 10^3$ м/с. Ракета движется вертикально вверх.

14.2. Масса ракеты с топливом $m_0 = 10^6$ кг. Рассчитайте расход топлива, необходимый для достижения ракетой первой космической скорости $v = 8 \cdot 10^3$ м/с, если скорость газовой струи относительно ракеты равна $u = 4 \cdot 10^3$ м/с.

14.3. Снаряд разорвался на два осколка одинаковой массы. Скорости осколков равны по модулю $v_1 = 300$ м/с и $v_2 = 400$ м/с и направлены перпендикулярно друг другу. Определите скорость снаряда до разрыва.

14.4. На одном конце неподвижной длинной тележки массой $m_1 = 25$ кг стоит мальчик массой $m_2 = 50$ кг. С какой скоростью будет двигаться тележка, если он побежит со скоростью $v = 3$ м/с относительно тележки?

14.5. Чему равен секундный расход топлива в момент старта ракеты массой $m = 10^6$ кг, если она стартует вертикально с ускорением $a = 3$ м/с^2? Скорость истечения газов относительно ракеты $u = 4 \cdot 10^3$ м/с.

Возьмите воздушный шар, надуйте его, а затем, не завязывая отверстие ниткой, отпустите. Объясните особенности движения шара.

§ 15. Закон сохранения момента импульса

Повторите: угловая скорость, момент импульса тела, закон сохранения энергии, закон сохранения импульса.

Момент импульса. Основное уравнение динамики вращательного движения тела под действием постоянного момента силы $M = \text{const}$ можно представить в виде

$$M = I\varepsilon = I\frac{\omega_2 - \omega_1}{\Delta t},$$

откуда

$$M\Delta t = I\omega_2 - I\omega_1. \qquad (15.1)$$

Как показывает опыт, если момент инерции тела изменяется, то уравнение динамики вращательного движения тела можно записать в более общем виде:

$$M\Delta t = \Delta(I\omega).$$

ЗАПОМНИТЕ

Произведение момента инерции тела на угловую скорость его вращения называется **моментом импульса**:

$$L = I\omega.$$

Закон сохранения момента импульса. Момент импульса — одна из важнейших характеристик вращательного движения тела.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МОМЕНТА ИМПУЛЬСА

Если суммарный момент сил, действующих на тело, относительно данной оси вращения равен нулю ($M = 0$), то

$$\Delta L = \Delta(I\omega) = 0,$$

т. е. момент импульса не изменяется:

$$L = I\omega = \text{const}.$$

Закон сохранения момента импульса справедлив не только для одного тела, но и для любой замкнутой системы тел.

Эффектной демонстрацией закона сохранения момента импульса является опыт с использованием вращающейся скамьи.

На скамью, имеющую вертикальную ось вращения (или легко вращающийся стул), встаёт человек, берёт в руки гантели или тяжёлые гири и разводит руки в стороны. Скамью с человеком приводят во вращение (рис. 1.41, *а*). Если человек опускает руки и прижимает их к туловищу (рис. 1.41, *б*), то его момент инерции существенно уменьшается, а угловая скорость вращения увеличивается; если он снова разводит руки, то угловая скорость вращения вновь уменьшается.

Закон сохранения момента импульса используют спортсмены, артисты балета и цирка (сальто, волчок на льду и т. п.).

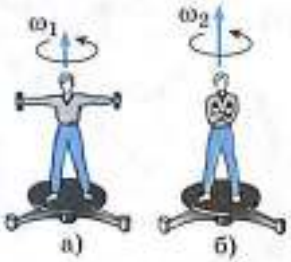


Рис. 1.41

ИНТЕРЕСНО Замечательной особенностью вращательного движения является свойство вращающихся тел при отсутствии взаимодействий с другими телами сохранять неизменным не только момент импульса, но и направление оси вращения в пространстве. Неизменным ориентиром для путешественников на поверхности Земли служит Полярная звезда. Примерно на эту звезду направлена ось вращения Земли, и кажущаяся неподвижность Полярной звезды на протяжении столетий наглядно доказывает, что в течение этого времени направление оси вращения Земли в пространстве не изменилось.

Эффект сохранения направления оси вращения в пространстве используется в приборе, называемом *гироскопом*.

Момент инерции. Момент количества движения. Закон сохранения момента импульса

1. Что называют моментом импульса? 2. Как связаны изменения момента импульса тела с моментом силы? 3. При каких условиях момент импульса тела остаётся неизменным? 4. Могут ли внутренние силы изменить угловую скорость системы?

РЕШИТЕ 15.1. Комета Галлея движется вокруг Солнца по вытянутому эллипсу, причём наибольшее удаление кометы от Солнца равно 35,2 а. е., а наименьшее удаление от Солнца — 0,6 а. е. (1 а. е. — астрономическая единица длины, равная расстоянию от Земли до Солнца; 1 а. е. = $1{,}5 \cdot 10^{11}$ м). Определите отношение максимальной скорости кометы к минимальной.

15.2. Человек стоит на вращающейся с некоторой угловой скоростью платформе. В вытянутых в стороны руках он держит по гире, масса каждой из них $m = 5$ кг. Расстояние от гирь до оси вращения $R_1 = 0{,}71$ м. Во сколько раз изменится частота вращения человека, если он прижмёт руки к туловищу так, что расстояние от оси вращения до гирь станет $R_2 = 0{,}2$ м? Момент инерции человека считайте в обоих случаях равным $I = 1$ кг $\cdot$ м^2.

15.3. Человек массой $m_1 = 60$ кг находится на неподвижной круглой платформе радиусом $R_2 = 10$ м и массой $m_2 = 120$ кг, которая может вращаться вокруг своей вертикальной оси. С какой угловой скоростью будет вращаться платформа, если человек станет двигаться по окружности радиусом $R_1 = 5$ м с линейной скоростью $v_1 = 2$ м/с относительно платформы?

По ссылке http://www.twizzle.ru/video/ откройте сайт «Всё для фигурного катания и танца», в разделе «Вращения» посмотрите видеофрагменты. Опишите наблюдаемые вращения с точки зрения физики. Приведите соответствующие выкладки.

§ 16. Закон сохранения энергии в механических процессах

Повторите: потенциальная энергия, кинетическая энергия.

Энергия. Открытие закона сохранения импульса показало, что механическое движение тел имеет количественную меру, сохраняющуюся при любых взаимодействиях тел. Этой мерой движения является импульс. Однако с помощью только импульса не удаётся дать полное объяснение всех закономерностей взаимодействия тел.

Рассмотрим такой пример. Два одинаковых резиновых шара движутся навстречу друг другу с одинаковыми скоростями. Что произойдёт при их столкновении? Если они только остановятся, то сумма их импульсов до столкновения и после столкновения одинакова и равна нулю — закон сохранения импульса выполняется. Если бы шары при столкновении могли только остановиться без каких-либо других изменений в них, то это означало бы, что механическое движение при взаимодействии тел может исчезать бесследно. Но природа устроена иначе.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ В природе никогда и нигде механическое движение тел не возникает само собой, никогда и ни при каких взаимодействиях механическое движение тел не исчезает бесследно.

Что же происходит с шарами при их столкновении, кроме изменения скоростей движения? Шары деформируются, их температура повышается. Изменение температуры тел свидетельствует об изменениях скоростей хаотичного теплового движения атомов, из которых состоят тела. Следовательно, механическое движение не исчезло бесследно, оно превратилось в другую форму движения материи. Имеется ли в природе мера движения материи, сохраняющаяся при любых превращениях одной формы движения в другую? Опыты и наблюдения показали, что такая мера движения в природе существует. Её назвали *энергией*.

ЗАПОМНИТЕ **Энергией** называется физическая величина, являющаяся количественной мерой различных форм движения материи.

Для точного определения энергии как физической величины необходимо найти её связь с другими величинами, выбрать единицу и найти способы её измерения.

ЗАПОМНИТЕ **Механической энергией** называется физическая величина, являющаяся количественной мерой механического движения тела при его превращениях в другие формы движения.

Кинетическая энергия. В качестве меры поступательного движения тел нужно найти физическую величину, одинаковую у различных поступательно движущихся тел при одинаковом изменении какой-либо другой формы движения, превращающейся в механическое поступательное движение. Для передачи разным телам одинаковой энергии можно, например, использовать пру-

жину. Опыт показывает, что одинаково сжатая стальная пружина сообщает телам с разными массами m_1, m_2, ..., m_n такие скорости v_1, v_2, ..., v_n, что произведение массы тела на квадрат скорости для всех тел оказывается одинаковым.

Следовательно, величина mv^2 может служить количественной мерой поступательного движения тел при превращениях других форм движения в поступательное механическое движение или поступательного механического движения в другие формы движения.

ЗАПОМНИТЕ В физике в качестве количественной меры поступательного механического движения при возникновении его из других форм движения или превращении в другие формы движения принята величина, равная половине произведения массы тела на квадрат скорости его движения. Эта физическая величина называется **кинетической энергией** тела и обозначается E_k:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Так как скорость является величиной, зависящей от выбора системы отсчёта, значение кинетической энергии тела зависит от выбора системы отсчёта.

Кинетическая энергия вращающегося тела. Кинетической энергией обладают не только тела, движущиеся поступательно, но и любые вращающиеся тела.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Кинетическая энергия вращающегося тела равна сумме кинетических энергий отдельных его частей:

$$E_k = \frac{m_1v_1^2}{2} + \frac{m_2v_2^2}{2} + \dots .$$

Так как угловые скорости всех точек вращающегося твёрдого тела одинаковы, то $v_1 = \omega r_1$, $v_2 = \omega r_2$, ...

Следовательно,

$$E_k = \frac{m_1\omega^2r_1^2}{2} + \frac{m_2\omega^2r_2^2}{2} + \dots = \frac{\omega^2}{2}(m_1r_1^2 + m_2r_2^2 + \dots).$$

Величина, стоящая в скобках (сумма моментов инерции всех точек твёрдого тела), есть момент инерции I тела относительно оси вращения.

Тогда формулу для кинетической энергии вращающегося тела можно записать в виде

$$E_k = \frac{I\omega^2}{2}.$$

Работа.

ЗАПОМНИТЕ **Работой A силы** называют скалярную физическую величину, которая равна произведению модулей векторов силы и перемещения на косинус угла между ними (рис. 1.42):

$$A = Fs\cos\alpha. \qquad (16.1)$$



Рис. 1.42

В зависимости от значения угла между векторами силы и скорости работа может иметь положительное или отрицательное значение. Если угол α лежит в пределах $0 \leqslant \alpha < 90°$, то работа силы положительна (рис. 1.43, *а*). Если же угол лежит в пределах $90° < \alpha \leqslant 180°$, то работа силы отрицательна (рис. 1.43, *б*). В случае $\alpha = 90°$ работа силы равна нулю.

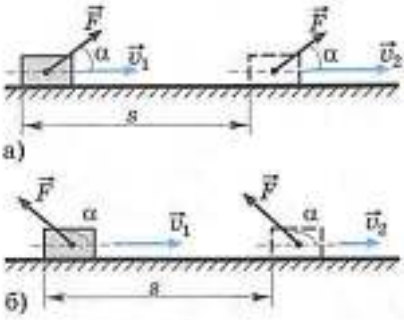


Рис. 1.43

За единицу работы в Международной системе принимается работа, совершаемая силой 1 Н на пути 1 м при движении по направлению вектора силы. Эта единица называется джоуль (1 Дж).

Связь работы и энергии. Понятие работы неразрывно связано с понятием энергии и её изменениями в процессе движения.

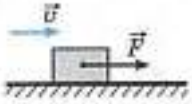


Рис. 1.44

Любое изменение скорости поступательного движения тела и его кинетической энергии E_k происходит в результате взаимодействия с другими телами. Используя второй закон Ньютона, установим связь изменений кинетической энергии тела с действующими на тело силами. Вычислим изменение кинетической энергии E_k тела массой m за время t при действии на него постоянной силы F. Если в начальный момент времени скорость тела равна нулю, то направление вектора скорости $\vec{v}$ тела в любой момент времени совпадает с направлением вектора равнодействующей силы $\vec{F}$ (рис. 1.44). Начальное значение кинетической энергии равно нулю. В момент времени t, когда скорость достигает значения v, кинетическая энергия тела равна $\frac{mv^2}{2}$, изменение кинетической энергии равно:

$$\Delta E_k = \frac{mv^2}{2}. \qquad (16.2)$$

Значение скорости v тела определяется выражением

$$v = at, \qquad (16.3)$$

или

$$v = \frac{Ft}{m}. \qquad (16.4)$$

Используя выражения (16.2) — (16.4), изменение кинетической энергии ΔE_k тела под действием силы F можно представить в следующем виде:

$$\Delta E_k = \frac{ma\,t\frac{F}{m}t}{2} = F\frac{at^2}{2} = Fs. \qquad (16.5)$$

Из формул (16.5) и (16.1) следует, что

$$\boxed{\Delta E_k = A.} \qquad (16.6)$$

Таким образом,

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ изменение кинетической энергии тела равно работе силы при перемещении тела.

Найдём теперь изменение кинетической энергии тела в случае, когда вектор равнодействующей силы направлен под углом к вектору скорости. Начнём с рассмотрения частного случая. Если вектор силы перпендикуляреи вектору скорости, тело движется равномерно по окружности. Сила является причиной изменения направления вектора скорости и возникновения центростремительного ускорения. При равномерном движении тела по окружности модуль его скорости не изменяется, следовательно, не изменяется и кинетическая энергия тела. Если равно нулю изменение кинетической энергии тела, то равна нулю и работа силы:

$$\Delta E_k = A = 0.$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Если вектор силы направлен под углом 90° к вектору скорости тела, то работа силы на любом пути равна нулю.

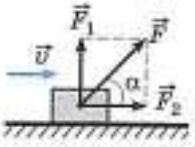


Рис. 1.45

Рассмотрим теперь общий случай. Пусть к телу приложена сила, направленная под углом α к вектору скорости тела. Вектор силы $\vec{F}$ можно представить как равнодействующую двух векторов сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ (рис. 1.45). Вектор силы $\vec{F}_1$ направлен перпендикулярно вектору скорости $\vec{v}$ тела, вектор силы $\vec{F}_2$ направлен параллельно вектору скорости $\vec{v}$ тела. Под действием силы $\vec{F}_1$, направленной перпендикулярно вектору скорости, кинетическая энергия тела не изменяется. Изменение кинетической энергии тела происходит только под действием силы $\vec{F}_2$, параллельной вектору скорости. Поэтому изменение кинетической энергии тела определяется выражением

$$\Delta E_k = F_2 s.$$

Значение составляющей силы F_2 равно:

$$F_2 = F\cos\alpha,$$

поэтому изменение кинетической энергии в общем случае также равно работе силы:

$$\Delta E_k = Fs\cos\alpha = A.$$

Если работа силы положительна, то кинетическая энергия тела увеличивается, а значит, растёт и скорость тела ($v_2 > v_1$). Если работа силы отрицательна, то кинетическая энергия тела уменьшается, а значит, уменьшается и скорость тела ($v_2 < v_1$).

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Так как работа равна изменению энергии, единица энергии в СИ совпадает с единицей работы — 1 Дж.

Работа силы тяжести. При перемещении тела вниз по наклонной плоскости (рис. 1.46) работа силы тяжести равна:

$$A = mgs\cos\alpha = mgh,$$

где h — высота наклонной плоскости; s — длина наклонной плоскости. Движение тела в поле силы тяжести из точки B в точку C по любой траектории можно мысленно представить состоящим из перемещений по наклонным отрезкам (рис. 1.47). Работа A силы тяжести на всём пути из точки B в точку C равна сумме работ на отдельных участках пути. Если на всём пути ускорение силы тяжести можно считать одинаковым, то эта работа равна:

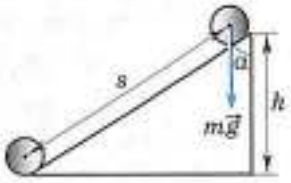


Рис. 1.46

$$A = mg\Delta h_1 + mg\Delta h_2 + \ldots + mg\Delta h_n = mg(h_B - h_C), \quad (16.7)$$

где h_B и h_C — высоты от поверхности Земли, на которых расположены соответственно точки B и C.

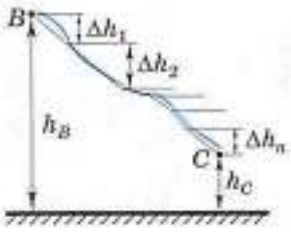


Рис. 1.47

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Равенство (16.7) показывает, что работа постоянной силы тяжести не зависит от траектории движения тела и всегда равна произведению модуля силы тяжести на разность высот в начальном и конечном положениях. При движении вниз работа силы тяжести положительна, при движении вверх отрицательна.

Если после движения по какой-либо траектории тело возвращается в исходную точку, то начальное h_1 и конечное h_2 значения высоты совпадают и работа силы тяжести оказывается равной нулю. Следовательно,

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ работа силы тяготения при движении тела по любой замкнутой траектории равна нулю.

При строгом решении задачи с учётом зависимости силы тяжести от расстояния до центра Земли получается точно такой же конечный результат.

Мощность.

ЗАПОМНИТЕ **Мощностью** называется величина, равная отношению совершённой работы к промежутку времени, за который она совершена:

$$P = \frac{A}{t}. \quad (16.8)$$

Мощность характеризует быстроту совершения работы.

Из формулы (16.8) можно определить единицу мощности. В СИ за единицу мощности принимается джоуль в секунду, иначе ватт (Вт): 1 Вт = 1 Дж/с.

Если мощность известна, то работа определяется равенством

$$A = Pt.$$

Мощность можно выразить через силу и скорость тела. Для этого подставим в формулу (16.8) выражение (16.1), получим

$$P = Fv\cos\alpha,$$

где v — значение скорости тела, определяемое из уравнения $s = vt$.

Потенциальная энергия. Если тело поднято над поверхностью Земли на некоторую высоту и затем свободно падает на Землю, его скорость увеличивается, кинетическая энергия возрастает. Увеличение кинетической энергии тела при свободном падении показывает, что поднятое над Землёй тело обладает некоторым запасом энергии. Другой пример — возникновение кинетической энергии поступательного движения тела за счёт энергии деформированной пружины. Опыт показывает, что, чем больше деформация пружины, тем большей кинетической энергией будет обладать тело, приводимое в движение этой пружиной.

ЗАПОМНИТЕ Энергия, которая зависит только от взаимного расположения тел или от взаимного расположения частей одного тела, называется **потенциальной энергией**.

В процессе свободного падения тела на Землю его кинетическая энергия возрастает ровно на столько, на сколько уменьшается потенциальная энергия. Поэтому изменение кинетической энергии ΔE_k равно изменению потенциальной энергии ΔE_p, взятому с противоположным знаком:

$$\Delta E_k = -\Delta E_p.$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Изменение потенциальной энергии равно работе равнодействующей приложенных к телу сил, взятой с противоположным знаком:

$$\Delta E_p = -A. \qquad (16.9)$$

Поэтому при свободном падении тела массой m вниз на расстояние h в случае, когда силу тяжести можно считать постоянной, изменение потенциальной энергии равно:

$$\Delta E_p = -mgh.$$

Значение потенциальной энергии тела, поднятого над Землёй, зависит от выбора начала отсчёта. Обычно принимают, что потенциальная энергия тела равна нулю на поверхности Земли.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ На небольших расстояниях от поверхности Земли, т. е. при условии g = const, потенциальная энергия E_p тела, находящегося на высоте h над поверхностью Земли, равна произведению массы m тела, ускорения свободного падения g и расстояния h от поверхности Земли:

$$E_p = mgh.$$

В отличие от кинетической энергии поступательного движения, которая может иметь лишь положительные значения, потенциальная энергия может иметь как положительные, так и отрицательные значения. При отсчёте высо-

ты от поверхности Земли тело массой m на глубине h ниже поверхности Земли обладает потенциальной энергией, имеющей отрицательное значение:

$$E_p = -mgh.$$

Потенциальная энергия упругой деформации. При восстановлении формы пружины сила упругости линейно убывает до нуля, её среднее значение на пути x равно полусумме начального и конечного значений:

$$F_{ср} = \frac{F_1 + F_2}{2} = \frac{kx + 0}{2} = \frac{kx}{2}.$$

Работа A силы упругости равна:

$$A = F_{ср}x, \quad A = \frac{kx}{2}x = \frac{kx^2}{2}. \tag{16.10}$$

Из выражений (16.9) и (16.10) для изменения потенциальной энергии ΔE_p упругой деформации получаем выражение

$$\Delta E_p = -\frac{kx^2}{2}.$$

Изменение потенциальной энергии ΔE_p упругой деформации равно разности значений потенциальной энергии в конечном и начальном состояниях:

$$\Delta E_p = E_{p_2} - E_{p_1}.$$

Если в конечном состоянии потенциальная энергия упругой деформации $E_{p_2} = 0$, то

$$E_{p_1} = \frac{kx^2}{2}.$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Потенциальная энергия упругой деформации тела равна половине произведения жёсткости k и квадрата деформации x:

$$E_p = \frac{kx^2}{2}.$$

Закон сохранения энергии. Любое изменение кинетической энергии тел под действием гравитационных сил или сил упругости можно рассматривать как результат превращения потенциальной энергии взаимодействующих тел в кинетическую или кинетической в потенциальную. При таких превращениях изменение кинетической энергии равно изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком (см. формулу (16.9)):

$$\Delta E_k = -\Delta E_p.$$

Сумма изменений кинетической и потенциальной энергий тел, взаимодействующих гравитационными силами и силами упругости, равна нулю:

$$\Delta E_k + \Delta E_p = 0.$$

Следовательно, сумма кинетической и потенциальной энергий тел, взаимодействующих гравитационными силами и силами упругости, остаётся постоянной:

$$E_k + E_p = \text{const}.$$

ЗАПОМНИТЕ Сумму кинетической и потенциальной энергий тел называют **полной механической энергией** E:

$$E = E_k + E_p.$$

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Полная механическая энергия системы тел, взаимодействующих между собой только силами тяготения и упругости, остаётся неизменной.

Закон сохранения полной механической энергии является одним из основных законов механики.

Всегда ли уменьшение кинетической энергии тела сопровождается равным по модулю увеличением его потенциальной энергии?

Рассмотрим случай торможения и остановки поезда. Кинетическая энергия поезда уменьшилась до нуля, но его потенциальная энергия при этом не изменилась.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Закон сохранения механической энергии не выполняется, если между телами действуют силы трения.

Однако опыт показывает, что механическое движение никогда не исчезает бесследно, никогда оно и не возникает само собой. Во время торможения поезда нагрелись тормозные колодки, колёса и рельсы. Кинетическая энергия поезда не исчезла, а превратилась во внутреннюю энергию теплового движения атомов.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ И ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ

При любых физических взаимодействиях энергия не возникает и не исчезает, а только превращается из одной формы в другую.



Энергия. Закон сохранения энергии. Симметрия пространства и времени



1. В каких системах выполняется закон сохранения механической энергии?
2. Чему равна кинетическая энергия вращательного движения твёрдого тела?

ЗАДАЧА 1. Покажите, что при выборе значения потенциальной энергии тяготения на бесконечно большом расстоянии от тела массой M равным нулю потенциальная энергия тела массой m в поле тяготения на расстоянии r от тела массой M равна $E_p = -G\frac{mM}{r}$.

Решение. Если потенциальная энергия тела $E_p = -G\frac{mM}{r}$, то изменение потенциальной энергии при перемещении тела на расстояние Δr (от $r_1 = r$ до $r_2 = r + \Delta r$) равно:

$$\Delta E_p = -G\frac{mM}{r} - \left(-G\frac{mM}{r + \Delta r}\right) = GmM\frac{\Delta r}{r(r + \Delta r)}.$$

Пренебрегая на малом отрезке Δr зависимостью силы тяготения F от расстояния r, из формулы (16.9) получаем $\Delta E_p = F\Delta r$. Отсюда при условии $\Delta r \to 0$ получаем

$$F = -\lim_{\Delta r \to 0} \frac{\Delta E_p}{\Delta r} = -G\frac{Mm}{r^2}.$$

Это выражение соответствует закону всемирного тяготения; следовательно, наше предположение о виде зависимости потенциальной энергии от расстояния между взаимодействующими телами справедливо.

ЗАДАЧА 2. Автомобиль движется равноускоренно по горизонтальной дороге и достигает скорости v. Одинакова ли работа, совершаемая двигателем при разгоне из состояния покоя до скорости $\frac{v}{2}$ и от скорости $\frac{v}{2}$ до v?

Решение. Будем считать, что за счёт работы, совершаемой двигателем, увеличивается кинетическая энергия автомобиля: $A = \Delta E_k$.

Следовательно, на первом участке разгона двигатель совершает работу A_1, равную

$$A_1 = \Delta E_{k1} = \frac{m(v/2)^2}{2} - 0 = \frac{mv^2}{8}.$$

На втором участке работа A_2 равна:

$$A_2 = \frac{mv^2}{2} - m\frac{(v/2)^2}{2} = \frac{3mv^2}{8}.$$

Отношение работ на указанных участках разгона $A_1 : A_2 = 1 : 3$, т. е. чем больше скорость, тем большую мощность должен развивать двигатель, чтобы поддерживать ускорение движения постоянным.

ЗАДАЧА 3. Рассчитайте вторую космическую скорость. Сравните её с первой космической скоростью.

Решение. Вторая космическая скорость — это скорость, необходимая кораблю для того, чтобы удалиться от Земли на бесконечно большое расстояние, т. е. покинуть поле тяготения Земли. Эту же скорость приобретает у Земли космический корабль, который на бесконечно большом расстоянии покоился, а затем стал падать на Землю под действием силы тяготения. В этом случае работа силы тяготения является мерой увеличения кинетической энергии корабля и одновременно мерой уменьшения его потенциальной энергии: $A = \Delta E_k = -\Delta E_p$.

Выразим ΔE_k и ΔE_p:

$$\Delta E_k = \frac{mv_{II}^2}{2} - 0 = \frac{mv_{II}^2}{2}, \quad \Delta E_p = -G\frac{mM}{R} - 0 = -G\frac{mM}{R}.$$

Так как $\Delta E_k = -\Delta E_p$, то $\frac{mv_{II}^2}{2} = G\frac{mM}{R}$, откуда

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{\frac{2GM}{R^2}R} = \sqrt{2gR}.$$

Подставляя числовые значения, получаем $v_{II} = 1{,}12 \cdot 10^4$ м/с.

Первая космическая скорость определяется уравнением $v_I = \sqrt{\frac{GM}{R}} = \sqrt{gR}$.

Сравнивая эти выражения, получаем $v_{II} = v_I\sqrt{2}$.

ЗАДАЧА 4. Рассчитайте третью космическую скорость, т. е. минимальную скорость, которую надо сообщить космическому кораблю, стартующему с Земли, чтобы он смог покинуть пределы Солнечной системы.

Решение. Для того чтобы покинуть пределы Солнечной системы, космический корабль массой m должен обладать скоростью v_C относительно Солнца, определяемой законом сохранения энергии:

$$\frac{mv_C^2}{2} - G\frac{mM_C}{R_C} = 0,$$

где $M_C = 2 \cdot 10^{30}$ кг — масса Солнца; $R_C = 1{,}5 \cdot 10^{11}$ м — радиус земной орбиты. Из этого выражения определим скорость корабля относительно Солнца:

$$v_C = \sqrt{\frac{2GM_C}{R_C}} = 4{,}22 \cdot 10^4 \text{ м/с}.$$

Корабль вследствие движения вместе с Землёй по орбите вокруг Солнца уже обладает скоростью v_0, которую можно найти, применив второй закон Ньютона: $\frac{GM_Cm}{R_C^2} = \frac{mv_0^2}{R_C}$. Отсюда $v_0 = \sqrt{\frac{GM_C}{R_C}} = 2{,}98 \cdot 10^4$ м/с.

Следовательно, при разгоне корабля в направлении вектора скорости движения Земли по его орбите вокруг Солнца скорость космического корабля относительно Земли для выхода за пределы Солнечной системы должна быть равна:

$$v_{кЗ} = v_C - v_0 = v_0(\sqrt{2} - 1) = 1{,}24 \cdot 10^4 \text{ м/с}.$$

Для того чтобы удалить корабль из поля тяготения Земли, ему надо сообщить вторую космическую скорость (её мы рассчитали в предыдущей задаче):

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2GM_З}{R_З}},$$

где $M_З = 6 \cdot 10^{24}$ кг — масса Земли; $R_З = 6{,}4 \cdot 10^6$ м — радиус Земли; $v_{II} = 1{,}12 \cdot 10^4$ м/с.

Следовательно, кинетическая энергия E_k, которую надо сообщить космическому кораблю для того, чтобы он покинул Солнечную систему, складывается из кинетической энергии E_{k1}, необходимой для того, чтобы его удалить из поля тяготения Земли, и кинетической энергии E_{k2}, необходимой для того, чтобы он с орбиты Земли ушёл в космическое пространство: $E_k = E_{k1} + E_{k2}$, или $\frac{mv_{III}^2}{2} = \frac{mv_{II}^2}{2} + \frac{mv_{кЗ}^2}{2}$. Отсюда

$$v_{III} = \sqrt{v_{II}^2 + v_{кЗ}^2}; \quad v_{III} = \sqrt{1{,}12^2 \cdot 10^8 + 1{,}24^2 \cdot 10^8} \text{ (м/с)} = 1{,}67 \cdot 10^4 \text{ м/с}.$$

ЗАДАЧА 5. Космический корабль обращается вокруг Луны по круговой орбите, радиус которой равен трём радиусам Луны ($R = 3R_Л$). Какую минимальную скорость нужно сообщить спускаемому аппарату, чтобы он прилунился на противоположной стороне Луны?

Решение. Начальную скорость v_0 космического корабля на круговой орбите определим, используя второй закон Ньютона:

$$G\frac{M_Л m}{R^2} = \frac{mv_0^2}{R},$$

где $M_Л$ — масса Луны; m — масса космического корабля. Отсюда

$$v_0 = \sqrt{\frac{GM_Л}{R}} = \sqrt{\frac{GM_Л}{3R_Л}}.$$

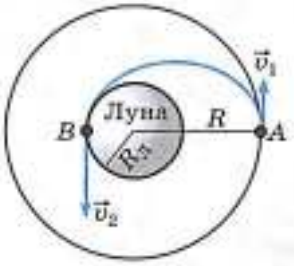


Рис. 1.48

Спускаемый аппарат массой m_1 должен двигаться по эллиптической орбите, касающейся поверхности Луны в точке B (рис. 1.48). При движении по этой траектории выполняются законы сохранения энергии и момента импульса:

$$\begin{cases} \dfrac{m_1v_1^2}{2} - G\dfrac{M_Л m_1}{R} = \dfrac{m_1v_2^2}{2} - G\dfrac{M_Л m_1}{R_Л}, & (1) \\ m_1v_1R\sin\varphi_A = m_1v_2R_Л\sin\varphi_B; & (2) \end{cases}$$

так как $\varphi_A = 90°$, $\varphi_B = 90°$, то $v_1R = v_2R_Л$.

Решая полученную систему уравнений и учитывая, что $R = 3R_Л$, получаем

$$v_2^2 - v_1^2 = 2GM_Л\left(\frac{1}{R_Л} - \frac{1}{3R_Л}\right), \quad v_1 3R_Л = v_2R_Л, \quad 8v_1^2 = 2GM_Л\frac{2}{3R_Л},$$

$$\begin{cases} v_1 = \sqrt{GM_Л/6R_Л}, \\ v_2 = 3v_1. \end{cases}$$

Из сравнения выражений для v_0 и v_1 видно, что $v_1 < v_0$. Следовательно, спускаемому аппарату нужно сообщить скорость в направлении, противоположном вектору скорости $\vec{v}_0$. Модуль скорости равен:

$$v = v_0 - v_1 = \sqrt{\frac{GM_Л}{3R_Л}} - \sqrt{\frac{GM_Л}{6R_Л}} = \sqrt{\frac{GM_Л}{R_Л}}\left(\frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{1}{\sqrt{6}}\right) = \sqrt{\frac{GM_Л}{R_Л}}(0{,}577 - 0{,}408) = 0{,}169\sqrt{\frac{GM_Л}{R_Л}}.$$

Масса и радиус Луны известны (значения берём из справочника): $R_Л = 1737$ км, $M_Л = 7{,}35 \cdot 10^{22}$ кг. Тогда $v = 284$ м/с.

РЕШИТЕ 16.1. Тело скользит по наклонной плоскости с высоты $h = 0{,}1$ м. После этого оно продолжает двигаться по горизонтали и останавливается. Горизонтальное смещение тела от исходной точки равно $l = 0{,}5$ м. Определите коэффициент трения, считая его одинаковым на наклонном и горизонтальном участках пути. Наклонная плоскость плавно переходит в горизонтальную.

16.2. Г. Гюйгенс утверждал, что если шар на невесомой и нерастяжимой нити вращается в вертикальной плоскости, то нить должна выдержать силу, равную по крайней мере ушестерённой силе тяжести, действующей на шар. Докажите это утверждение.

16.3. Пуля массой 5 г попадает в ящик с песком массой 1 кг, подвешенный на тросе. Максимальное отклонение ящика от положения равновесия таково, что его центр тяжести поднялся на высоту 0,2 м от первоначального уровня. Определите скорость пули.

16.4. Под каким углом могут разлететься два тела одинаковой массы после упругого нецентрального столкновения? (Упругим называется столкновение, при котором кинетическая энергия поступательного движения тел сохраняется; нецентральное столкновение — столкновение, при котором направление относительной скорости первого тела не проходит через центр масс второго тела.)

16.5. Пуля вылетает из пневматической винтовки со скоростью 50 м/с и, попав в неподвижный брусок, лежащий на горизонтальной поверхности стола, застревает в нём. На какое расстояние передвинется брусок, если его масса в 49 раз больше массы пули, а коэффициент трения между бруском и поверхностью стола равен 0,1?

16.6. Метеорит, скорость которого на большом расстоянии от Луны $v_0 = 2360$ м/с, летит по направлению к Луне, радиус которой $R = 1{,}74 \cdot 10^6$ м. Определите минимальное прицельное расстояние l, при котором метеорит не упадёт на поверхность Луны (рис. 1.49). Ускорение свободного падения на Луне $g_Л = 1{,}6$ м/с^2.

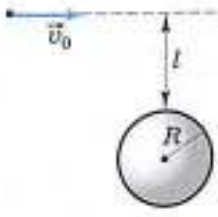


Рис. 1.49

Бросьте мяч с некоторой высоты. Каково будет дальнейшее движение мяча? На какую высоту подлетит мяч при последующих соударениях с поверхностью? Выполните эксперимент на различных поверхностях, например на жёстком полу, на мягкой поверхности. Объясните, с чем связаны различия.

§ 17. Механические колебания

Повторите: колебания, колебательная система.

В природе и технике часто встречаются движения тел с переменными ускорениями. Такие движения возникают под действием изменяющихся со временем сил.

Примером движения тел с переменными ускорениями являются механические колебания.

Колебания тел происходят только в результате их взаимодействия с другими телами.

ЗАПОМНИТЕ

Механическими колебаниями называют движения тел, повторяющиеся точно или приблизительно через одинаковые промежутки времени.

Тела, взаимодействие между которыми приводит к возникновению колебаний, составляют **колебательную систему**.

Силы, действующие внутри колебательной системы, называют **внутренними силами**.

Колебания, происходящие под действием внутренних сил в колебательной системе, называют **свободными колебаниями**.

Колебания маятника являются примером свободных механических колебаний.

Однажды выведенный из положения равновесия маятник длительное время совершает колебания без внешних воздействий.

Условия возникновения свободных механических колебаний. Свободные механические колебания возникают при выполнении следующих условий.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

1. В одном определённом положении тела в пространстве, называемом положением равновесия, равнодействующая сил, приложенных к телу, должна быть равна нулю. При выведении тела из положения равновесия равнодействующая всех сил должна быть отлична от нуля и направлена к положению равновесия.
2. Для начала свободных колебаний система должна быть выведена из положения равновесия внешним воздействием.
3. Силы трения в системе должны быть малы по сравнению с силами, зависящими от координат.

При любом механическом движении тел в результате действия сил трения происходит превращение части механической энергии во внутреннюю энергию теплового движения атомов и молекул, отклонения тела от положения равновесия постепенно уменьшаются и через некоторое время колебания прекращаются.

ЗАПОМНИТЕ

Уменьшение отклонений тела от положения равновесия с течением времени называется **затуханием колебаний**.

Свободные механические колебания всегда оказываются затухающими колебаниями.

Период, частота и амплитуда колебаний.

ЗАПОМНИТЕ Минимальный интервал времени, через который тело оказывается в той же точке пространства и движется с той же скоростью и с тем же ускорением, называется **периодом колебаний**. Период колебаний измеряется в секундах, обозначается латинской буквой T.

Физическая величина, равная числу колебаний, совершаемых за одну секунду, называется **частотой колебаний**. Частота обозначается греческой буквой ν (ню).

Если тело совершило n колебаний за время t с, то частота колебаний равна:

$$\nu = \frac{n}{t},$$

а период колебаний T равен:

$$T = \frac{t}{n}.$$

Единица частоты в СИ называется герц (Гц): 1 Гц = 1 $с^{-1}$. При частоте 1 герц совершается одно колебание за одну секунду.

Период и частота колебаний связаны соотношением

$$T = \frac{1}{\nu}.$$

Одной из основных характеристик колебаний, кроме их периода и частоты, является амплитуда колебаний.

ЗАПОМНИТЕ **Амплитудой** механических колебаний тела называется наибольшее значение смещения тела от положения равновесия.

Гармонические колебания.

ЗАПОМНИТЕ Если координата x тела, совершающего колебания вдоль оси OX, изменяется со временем t по формуле синуса или косинуса

$$x = x_0 \sin 2\pi\nu t \text{ или } x = x_0 \cos 2\pi\nu t, \qquad (17.1)$$

то такие колебания называются **гармоническими колебаниями**.

В уравнениях (17.1) x_0 — амплитуда колебаний; ν — частота колебаний. Вместо частоты ν в уравнении гармонических колебаний может быть использована циклическая частота ω:

$$\omega = 2\pi\nu, \; x = x_0 \cos \omega t$$

или период колебаний T:

$$x = x_0 \cos \frac{2\pi}{T} t.$$

ЗАПОМНИТЕ Величина, стоящая под знаком косинуса или синуса, называется **фазой** φ **гармонического колебания**:

$$\varphi = 2\pi\nu t = \omega t = \frac{2\pi}{T} t.$$

Маятник. Рассмотрим колебания тела, подвешенного на нити, — маятника. Когда тело неподвижно и находится на одной вертикальной прямой с точкой подвеса, сила упругости $\vec{F}_{упр}$ и сила тяжести $m\vec{g}$ равны по модулю и направлены противоположно, их равнодействующая равна нулю. Это положение тела является положением равновесия. При отклонении тела от положения равновесия вправо или влево равнодействующая $\vec{F}$ сил тяжести и упругости не равна нулю и направлена к положению равновесия (рис. 1.50). Если груз отклонить и отпустить, то он начинает двигаться с ускорением к положению равновесия, так как равнодействующая сила отлична от нуля. По мере приближения к положению равновесия угол между векторами силы тяжести и силы упругости увеличивается, равнодействующая сил изменяется по модулю и направлению, но остаётся направленной к положению равновесия. После прохождения положения равновесия угол между векторами силы тяжести и силы упругости уменьшается, вектор равнодействующей силы изменяется и вновь направлен к положению равновесия. Под действием этой силы скорость движения тела постепенно уменьшается и становится равной нулю при максимальном отклонении от положения равновесия. Затем направление движения вновь изменяется, тело движется к положению равновесия и т. д., процесс повторяется. Для упрощения теоретического рассмотрения задачи о колебаниях маятника применяется идеализированная модель — математический маятник.

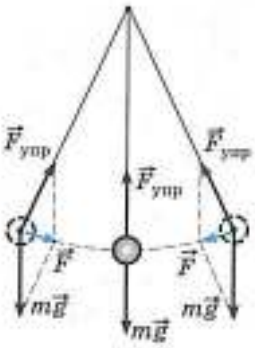


Рис. 1.50

ЗАПОМНИТЕ Тело массой m столь малых размеров, что его можно считать материальной точкой, подвешенное на невесомой и нерастяжимой нити длиной l, называется **математическим маятником**. При этом силы трения в подвесе и сопротивление воздуха отсутствуют.

При малых углах отклонения от положения равновесия колебания математического маятника являются приблизительно гармоническими. Период колебаний математического маятника определяется формулой математического маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

где l — длина подвеса маятника; g — ускорение свободного падения.

Формулу математического маятника можно использовать для вычисления периода колебаний тела на подвесе, если размеры тела малы по сравнению с длиной подвеса и масса подвеса пренебрежимо мала по сравнению с массой тела. Зависимость периода колебаний маятника от ускорения силы тяжести используется на практике для точных измерений ускорения силы тяжести в различных местах на поверхности Земли. По результатам измерений ускорения силы тяжести можно обнаружить район залегания полезных ископаемых. В тех местах, где находятся полезные ископаемые с плотностью более высо-

кой, чем средняя плотность земной коры (например, залежи железной руды), ускорение силы тяжести имеет большое числовое значение. Скопления нефти и газа под землёй связаны с пористыми породами пониженной плотности, поэтому над нефтяными и газовыми месторождениями ускорение силы тяжести имеет меньшее числовое значение.

Превращения энергии при свободных колебаниях. При свободных незатухающих колебаниях маятника по мере отклонения от положения равновесия увеличивается его потенциальная энергия и уменьшается кинетическая энергия, однако сумма потенциальной и кинетической энергий по закону сохранения энергии остаётся постоянной в любой момент времени:

$$\frac{mv^2}{2} + mgh = \text{const},$$

где v — скорость маятника в произвольный момент времени; h — его высота относительно положения равновесия в тот же момент времени.

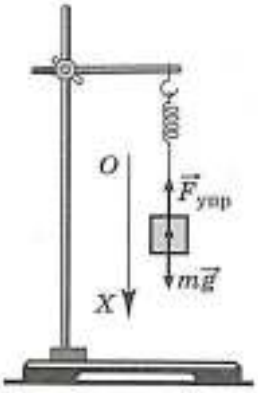


Рис. 1.51

Другой пример свободных механических колебаний — колебания груза, подвешенного на пружине. Если один конец спиральной пружины жёсткостью k закрепить на вертикально установленном штативе, а к другому концу подвесить груз массой m, то груз может находиться в состоянии покоя. Запишем условие равновесия груза:

$$m\vec{g} + \vec{F}_{упр} = 0.$$

Перепишем это уравнение для проекций сил тяжести и упругости на ось OX, направленную вертикально вниз, и учтём, что по закону Гука сила упругости $\vec{F}_{упр} = -k\vec{x}$. Тогда в положении равновесия (рис. 1.51) деформация пружины x_0 удовлетворяет условию

$$mg - kx_0 = 0;\ mg = kx_0.$$

При смещении груза вниз от положения равновесия на расстояние x сила упругости равна:

$$F_{упр} = -k(x_0 + x) = -kx_0 - kx,$$

а равнодействующая $\vec{F}$ силы тяжести и силы упругости равна:

$$\vec{F} = \vec{F}_{упр} + m\vec{g}, \quad F = -kx_0 - kx + mg = -kx.$$

Знак «минус» в последнем уравнении показывает, что равнодействующая направлена противоположно смещению x, т. е. вверх (рис. 1.52). Под действием равнодействующей груз движется вверх с ускорением a:

$$a = \frac{F}{m} = -\frac{k}{m}x. \qquad (17.2)$$

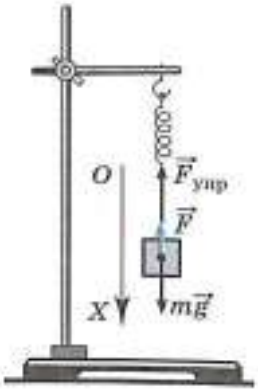


Рис. 1.52

При достижении положения равновесия ($x = 0$) ускорение груза становится равным нулю, но по инерции

груз продолжает движение вверх до тех пор, пока весь запас кинетической энергии тела, приобретённой в процессе ускоренного движения к положению равновесия, не перейдёт в потенциальную энергию. После достижения верхней точки подъёма груз начинает ускоренное движение вниз, так как выше положения равновесия равнодействующая $\vec{F}$ силы тяжести и силы упругости направлена вниз и вновь равна:

$$\vec{F} = -k\vec{x}.$$

Так как с изменением смещения x груза от положения равновесия равнодействующая $\vec{F}$ изменяется по модулю и направлению, колебательное движение груза на пружине не является равноускоренным движением. Закон движения груза на пружине можно найти, решив уравнение (17.2).

Ускорение прямолинейного движения тела вдоль координатной оси является первой производной проекции скорости тела на эту ось или второй производной координаты:

$$a_x = v_x' = (x')' = x''. \qquad (17.3)$$

Поэтому из уравнений (17.2) и (17.3) следует:

$$x'' = -\frac{k}{m}x. \qquad (17.4)$$

Введя обозначение $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$, из формулы (17.4) получим

$$\boxed{x'' = -\omega_0^2 x.} \qquad (17.5)$$

где ω_0 — собственная частота колебательной системы.

Решением уравнения (17.5) является функция

$$x = x_0\cos\omega_0 t \quad \text{или} \quad x = x_0\sin\omega_0 t. \qquad (17.6)$$

Это утверждение легко проверить для первого решения, выполнив дважды операцию дифференцирования:

$$x' = -x_0\omega_0\sin\omega_0 t, \quad x'' = -x_0\omega_0^2\cos\omega_0 t = -\omega_0^2 x.$$

Полученное в качестве решения уравнение (17.6) движения груза на пружине показывает, что координата x груза периодически изменяется со временем по формуле косинуса или синуса.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Если на тело действует только сила упругости или действия всех сил, кроме силы упругости, скомпенсированы, то тело совершает колебания, которые являются гармоническими колебаниями с амплитудой x_0, циклической частотой

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

и линейной частотой

$$\nu_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}.$$

Период T гармонических колебаний груза на пружине равен:

$$T = \frac{1}{\nu_0} = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

При гармонических колебаниях под действием силы упругости в любой момент времени сумма кинетической энергии E_k и потенциальной энергии E_p упругой деформации пружины остаётся постоянной:

$$E_k + E_p = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \text{const}.$$

Резонанс.

ЗАПОМНИТЕ Если колебания совершаются под действием периодически действующих внешних сил, то такие колебания называются **вынужденными колебаниями.**

При возбуждении вынужденных колебаний энергия тела изменяется за счёт действия внешних сил. Особого рассмотрения заслуживает случай действия переменной силы на систему, способную совершать свободные механические колебания. Опыт показывает, что при плавном увеличении частоты воздействия внешней силы амплитуда вынужденных колебаний тела сначала увеличивается, затем, после достижения некоторого максимального значения, постепенно убывает. Максимального значения амплитуда вынужденных колебаний достигает при частоте ν колебаний силы, примерно равной собственной частоте ν_0 колебаний системы.

ЗАПОМНИТЕ Явление возрастания амплитуды установившихся вынужденных колебаний до максимального значения при приближении частоты изменения внешней силы к частоте свободных колебаний системы называется **резонансом.**

При совпадении частоты ν изменения силы с собственной частотой ν_0 колебаний системы внешняя сила в течение всего периода направлена в ту же сторону, что и вектор скорости колеблющегося тела. Поэтому в течение всего периода внешняя сила совершает положительную работу, увеличивая амплитуду колебаний тела.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Так как при резонансе внешняя сила совершает за период над колебательной системой максимальную положительную работу, условие резонанса можно определить как условие максимальной передачи энергии колебательной системе.

Свободные незатухающие колебания. Свободные затухающие колебания. Резонанс

1. При каких условиях возникают свободные механические колебания? 2. Какие колебания называются гармоническими колебаниями? 3. От каких параметров зависит период колебаний маятника? 4. Что такое резонанс?

ЗАДАЧА. Рассчитайте период малых колебаний математического маятника.

Решение. При отклонении маятника от положения равновесия момент M силы тяжести относительно точки подвеса равен $M = mgd = mgl\sin\alpha$.

Под действием этого момента сил маятник движется с угловым ускорением ε, определяемым уравнением динамики вращательного движения: $M = I\varepsilon$, где I — момент инерции маятника, равный ml^2. Так как $\varepsilon = \alpha''$, получаем $-mgl\sin\alpha = ml^2\alpha''$, $-g\sin\alpha = l\alpha''$.

Знак «минус» показывает, что возвращающий момент сил направлен в сторону, противоположную отклонению маятника от положения равновесия. Так как по условию задачи амплитуда колебаний мала, то можно записать: $\sin\alpha \approx \alpha$, $-g\alpha = l\alpha''$, $\alpha'' = -\alpha g/l$. Введя обозначение $g/l = \omega_0^2$, получим дифференциальное уравнение гармонических колебаний с периодом T, равным:

$$T = 2\pi/\omega_0 = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Решением полученного уравнения является функция $\alpha = \alpha_{max}\sin\omega_0 t$ или $\alpha = \alpha_{max}\cos\omega_0 t$. Вид этой функции определяется выбором момента начала отсчёта времени. Если мы отклоним маятник от положения равновесия, отпустим и одновременно начнём отсчёт времени, то решением уравнения будет функция $\alpha = \alpha_{max}\cos\omega_0 t$, так как при $t = 0$ $\alpha = \alpha_{max}$. Если же мы начнём отсчёт времени в момент прохождения положения равновесия, то решением уравнения будет функция $\alpha = \alpha_{max}\sin\omega_0 t$, так как при $t = 0$ $\alpha = 0$.

При малых значениях угла α отклонение x маятника от положения равновесия примерно равно длине дуги окружности радиусом l с центральным углом α: $x \approx l\alpha_{max}\sin\omega_0 t$. Обозначив $l\alpha_{max} = x_{max}$, получим $x \approx x_{max}\sin\omega_0 t$, $v = x' = x_{max}\omega_0\cos\omega_0 t$, т. е. координата x смещения маятника от положения равновесия и скорость v изменяются также по гармоническому закону.

РЕШИТЕ

17.1. Груз массой m подвешен на двух пружинах жёсткостью k_1 и k_2. Чему равны периоды малых колебаний груза в случаях:
а) пружины соединены параллельно;
б) пружины соединены последовательно?

17.2. Рассчитайте периоды колебаний математического маятника длиной l, подвешенного в лифте, в следующих случаях:
а) лифт движется равномерно;
б) лифт поднимается с ускорением a, направленным вертикально вверх;
в) лифт опускается с ускорением a, направленным вертикально вниз.

17.3. Рассчитайте период колебаний математического маятника длиной l, подвешенного в вагоне, при движении вагона в горизонтальном направлении с ускорением a.

Оглядитесь вокруг, найдите примеры колебательного движения в природе. Укажите, к какому типу колебаний оно относится.

Исследуйте колебания пружинного маятника. Для этого закрепите пружину в штативе и подвесьте на неё груз массой 100 г. Запустите колебательный процесс, сместив груз на 4—5 см вниз. Посчитайте, сколько колебаний совершит система за 2—3 мин.

Затем поставьте снизу сосуд с водой. Колебания будут совершаться в более упругой среде. Также запустите колебательный процесс и зафиксируйте, сколько колебаний совершит система в новых условиях.

Сделайте вывод о влиянии среды на процесс затухания колебаний.

§ 18. Механические волны

Повторите: строение вещества, упругая среда, свойства газа, давление газа.

В непрерывной упругой среде, состоящей из взаимодействующих частиц, колебания частиц в одном месте вызывают вынужденные колебания соседних частиц, те, в свою очередь, возбуждают колебания следующих за ними частиц и т. д.

ЗАПОМНИТЕ Процесс распространения механических колебаний в твёрдых, жидких и газообразных телах называется **механической волной**.

Волны, в которых колебания происходят перпендикулярно направлению распространения, называются **поперечными волнами**.

Волны, в которых колебания происходят вдоль направления распространения, называются **продольными волнами**.

Примером продольных волн являются звуковые волны. Например, колебания струны гитары сопровождаются периодическими сжатиями и разрежениями воздуха вблизи неё.

Эти процессы сжатия и разрежения распространяются в воздухе во все стороны. Они и являются звуковыми волнами. Ощущение звука в наших органах слуха возникает при периодических изменениях давления воздуха. Звуковые волны с большой амплитудой изменения звукового давления воспринимаются человеческим ухом как громкие звуки, с малой амплитудой изменения звукового давления — как тихие.

ЗАПОМНИТЕ Звуковые колебания высокой частоты называются **звуками высокого тона**, звуковые колебания низкой частоты называются **звуками низкого тона**. Органы слуха человека способны воспринимать звуки с частотой в пределах примерно от 20 до 20 000 Гц.

Продольные механические волны с частотой менее 20 Гц называют **инфразвуком**, с частотой более 20 000 Гц — **ультразвуком**.

Звуковые волны, встречаясь с любым телом, вызывают его вынужденные колебания.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Если частота собственных свободных колебаний тела совпадает с частотой звуковой волны, то условия для передачи энергии от звуковой волны телу оказываются наилучшими, амплитуда вынужденных колебаний при этом достигает максимального значения — наблюдается акустический резонанс.

Акустическими резонаторами являются корпус гитары, корпус скрипки, трубы духовых инструментов.

Уравнение волны. Если тело колеблется вдоль оси OX по гармоническому закону с частотой ν, то изменение давления воздуха вблизи колеблющегося тела происходит также по гармоническому закону:

$$p = p_0 \cos 2\pi\nu t. \qquad (18.1)$$

Волны сжатия и разрежения, возникающие около колеблющегося тела, достигают точки, удалённой на расстояние x, спустя время $\Delta t = \frac{x}{v}$, где v — скорость распространения изменения давления воздуха. Следовательно, в этой точке колебания происходят по тому же закону (см. формулу (18.1)), что и вблизи источника звука, но с запаздыванием по времени на величину Δt:

$$p = p_0 \cos 2\pi\nu(t - \Delta t) = p_0 \cos\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{x}{v}\right). \qquad (18.2)$$

ЗАПОМНИТЕ Уравнение (18.2) называется **уравнением волны**.

Оно применимо для описания звуковых колебаний при условии, если звуковую волну можно считать плоской, т. е. принять, что колебания распространяются только в направлении оси OX и амплитуда их не убывает с увеличением расстояния от источника звука. В этом случае обнаруживается двойная периодичность волнового процесса — временная и пространственная.

Действительно, согласно уравнению (18.2) колебания давления в любой фиксированной точке пространства (x = const) происходят по гармоническому закону с частотой ν и с временно́й периодичностью. В разных же точках пространства колебания в один и тот же момент времени (t = const) различаются значениями фазы φ колебаний:

$$\varphi = -\frac{2\pi x}{Tv}.$$

Зависимость давления от координаты x, выражаемая уравнением (18.2), также является гармонической.

Длина волны. При распространении гармонических колебаний изменение давления с течением времени в какой-нибудь одной точке пространства повторяется через определённый промежуток времени T — период колебаний. Но при этом, как уже было сказано, наблюдается и пространственная периодичность и можно указать расстояние λ вдоль направления распространения волны, на котором происходит полный цикл изменения давления (для данного момента времени t):

$$p_0 \cos\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{x}{v}\right) = p_0 \cos\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{x+\lambda}{v}\right).$$

Из этого уравнения получаем $\frac{2\pi\lambda}{Tv} = 2\pi$, откуда

$$\lambda = vT. \qquad (18.3)$$

ЗАПОМНИТЕ Расстояние λ называется **длиной волны** (рис. 1.53).

Из выражения (18.3) следует, что **длину волны** λ можно определить как расстояние, на которое распространяются колебания за один период.

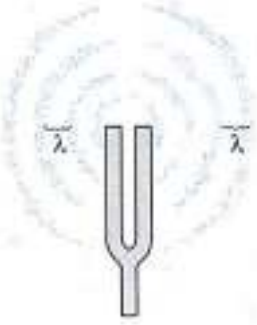


Рис. 1.53

Суперпозиция волн. Опыт показывает, что механические волны обладают замечательным свойством: они проходят через одно и то же место пространства, не оказывая никакого влияния друг на друга. Это свойство волн определяют как подчинение их *принципу суперпозиции*.

ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ ВОЛН В местах наложения волн, приходящих от различных источников, смещение частиц в любой момент времени t равно геометрической сумме смещений, вызываемых в данной точке всеми пришедшими волнами.

При наложении звуковых волн в точке A, находящейся на расстояниях l_1 и l_2 от двух источников с частотами ν_1 и ν_2 (рис. 1.54), звуковые колебания в этой точке будут происходить по закону:

$$p = p_1 \cos 2\pi\nu_1\left(t - \frac{l_1}{v}\right) + p_2 \cos 2\pi\nu_2\left(t - \frac{l_2}{v}\right).$$

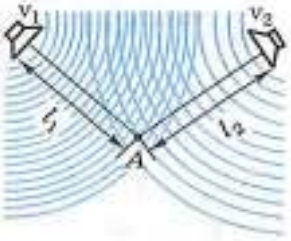


Рис. 1.54

Интерференция волн.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ При совпадении частот и постоянной разности фаз наблюдается явление *интерференции волн*.

В результате интерференции волн от двух источников колебаний с одинаковой частотой амплитуда результирующих колебаний в различных точках пространства оказывается неодинаковой. Она максимальна в тех точках, разность хода до которых от этих источников кратна целому числу длин волн, и минимальна в тех точках, разность хода до которых составляет нечётное число половин длины волны.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Возникновение интерференционных максимумов и минимумов в пространстве не противоречит закону сохранения энергии. При интерференции волн происходит лишь перераспределение энергии колебаний в пространстве.

Используя два источника звука с одинаковой частотой колебаний ν, можно определить скорость v распространения звука в воздухе путём измерения расстояния между двумя соседними интерференционными минимумами. Для этого необходимо присоединить два динамика к выходу одного звукового генератора и перемещать приёмное устройство вдоль прямой между динамиками. Два соседних интерференционных минимума находятся на расстоянии $\lambda/2$ друг от друга.

Определив расстояние между соседними интерференционными минимумами экспериментальным путём и зная частоту колебаний ν, можно вычислить скорость звука, используя выражение (18.3):

$$\lambda = vT = \frac{v}{\nu},$$

$$v = \lambda\nu.$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ При возникновении волн их частота определяется частотой колебаний источника колебаний, а скорость распространения зависит от свойств среды. Поэтому при распространении колебаний с одной и той же частотой длина волны в разных средах оказывается различной.

Сейсмические волны. В упругой земной коре возможно распространение как продольных, так и поперечных волн.

Сейсмическими волнами называют волны в земной коре, возникающие при землетрясениях. Продольные сейсмические волны — волны сжатия и разрежения земной коры называют *P*-волнами. Скорость их распространения примерно 8 км/с. Поперечные сейсмические волны называют *S*-волнами. Их скорость равна примерно 5 км/с.



Рис. 1.55

Кроме *P*- и *S*-волн, распространяющихся внутри Земли, толчок землетрясения вызывает появление *L*-волн, разбегающихся во все стороны от эпицентра землетрясения по поверхности Земли (рис. 1.55). Из-за различия скоростей распространения продольных и поперечных сейсмических волн они регистрируются сейсмографом в разное время. По времени запаздывания поперечных волн относительно момента первой регистрации продольных сейсмических волн и известным значениям скоростей этих волн определяется расстояние до места землетрясения.

Колебания. Механические волны. Продольные и поперечные волны. Характеристики волны

1. В чём заключается физический смысл уравнения волны? 2. Чем отличаются поперечные волны от продольных? 3. Поясните, что означает принцип суперпозиции волн. 4. При каких условиях наблюдается явление интерференции волн?

ОТВЕТЬТЕ НА ИТОГОВЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ

1. Дайте определения следующих понятий:
а) механическое движение;
б) система отсчёта;
в) путь;
г) траектория;
д) материальная точка;
е) мгновенная скорость;
ж) ускорение.

2. Сравните характеристики равномерного и неравномерного движения.

3. Постройте и сравните графики зависимостей перемещения, скорости и ускорения от времени для равномерного и неравномерного движения. Покажите, как по этим графикам найти каждую из характеристик движения материальной точки.

4. Сформулируйте три закона Ньютона.

5. Сформулируйте принцип относительности движения и приведите примеры, иллюстрирующие этот принцип.

6. Дайте определения следующих понятий:
а) угловая скорость;
б) угловое ускорение;
в) момент инерции;
г) центр тяжести;
д) момент силы.

7. Сравните характеристики поступательного и вращательного движения.

8. Сформулируйте законы сохранения импульса, энергии и момента импульса.

9. Дайте определения следующих понятий:
а) колебательная система;
б) свободные колебания;
в) гармонические колебания;
г) вынужденные колебания;
д) период колебаний.

10. Перечислите физические модели, которые рассматривались в этой главе, и дайте определение каждой из них.

1. Прочитайте статью К. Э. Циолковского «Биология карликов и великанов». Рассчитайте ускорения свободного падения для других планет Солнечной системы, сравните их.
2. Расскажите о влиянии силы тяжести на растения — геотропизме.
3. Сделайте небольшое сообщение о том, каким образом мы определяем наличие и направление силы тяжести. Какие системы имеются у человека, растений и других живых организмов для ориентирования в поле силы тяжести?
4. Одним из приборов, с помощью которых можно предсказывать землетрясения, является сейсмограф Голицына. Опишите принцип действия прибора.

ЕГЭ

А1. Лодка должна попасть на противоположный берег по кратчайшему пути (в системе отсчёта, связанной с берегом). Модуль скорости течения реки u, а модуль скорости лодки относительно воды v ($v > u$). Модуль скорости лодки относительно берега должен быть равен

1) $v + u$ 2) $v - u$ 3) $\sqrt{v^2 - u^2}$ 4) $\sqrt{v^2 + u^2}$

В2. Автомобиль, двигающийся со скоростью v_0, начинает тормозить и останавливается через время t, двигаясь равноускоренно. Чему равен тормозной путь автомобиля и путь, пройденный за время $t/2$ с момента начала движения?

Установите соответствие между физическими величинами и формулами, по которым их можно рассчитать. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные буквы под соответствующими цифрами.

Физическая величина	Формула
1) тормозной путь 2) путь, пройденный от начала торможения за время $t/2$	А) $v_0 t$ Б) $\frac{v_0 t}{2}$ В) $\frac{v_0 t}{4}$ Г) $\frac{3v_0 t}{8}$

1	2

А3. Зависимость координаты от времени для некоторого тела описывается уравнением $x = Bt + Ct^2$, где $B = 12$ м/с, $C = -2$ м/с^2. В какой момент времени проекция скорости тела на ось равна нулю?

1) 6 с 2) 3 с 3) 2 с 4) 0 с

А4. В трубке, из которой откачан воздух, на одной и той же высоте находятся дробинка, пробка и птичье перо. Какое из этих тел раньше всех достигнет дна трубки при свободном падении с одной высоты?

1) дробинка
2) пробка
3) птичье перо
4) все три тела достигнут дна трубки одновременно

С5. С высоты $H = 20$ м свободно падает стальной шарик. Через $t = 1$ с после начала падения он сталкивается с неподвижной плитой, плоскость которой наклонена под углом 30° к горизонту. На какую высоту h над поверхностью Земли поднимется шарик после удара? Удар шарика о плиту считайте абсолютно упругим. Сопротивление воздуха мало.

А6. Период обращения Земли вокруг Солнца равен одному году, радиус орбиты Земли равен 150 млн км. Скорость движения Земли по орбите примерно равна

1) 30 м/с 2) 30 км/с 3) 150 км/с 4) 1800 км/с

А7. Яблоко массой 0,3 кг падает с дерева. Выберите верное утверждение.

1) Яблоко действует на Землю с силой 3 Н, а Земля не действует на яблоко.
2) Земля действует на яблоко с силой 3 Н, а яблоко не действует на Землю.
3) Яблоко и Земля не действуют друг на друга.
4) Яблоко и Земля действуют друг на друга с силой 3 Н.

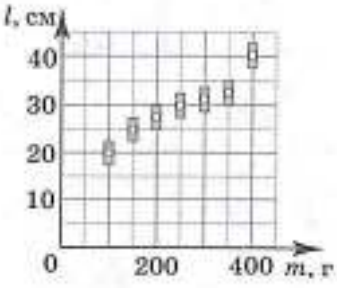
А8. На полу лифта, движущегося с постоянным ускорением $\vec{a}$, направленным вертикально вверх, лежит груз массой m. Чему равен вес этого груза?

1) mg 2) 0 3) $m(g + a)$ 4) $m(g - a)$

А9. На графике представлены результаты измерения длины l вертикально висящей пружины при различной массе m груза, подвешенного к ней. Погрешности измерения

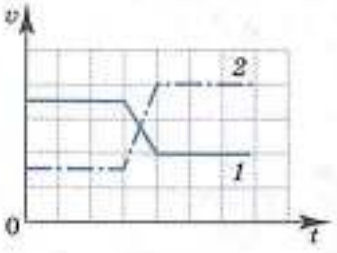
величин, отложенных по осям, соответствуют высоте и ширине показанных на графике прямоугольников.
С учётом погрешности измерений можно утверждать, что жёсткость пружины k по данным графика приблизительно равна

1) 5 Н/м 2) 10 Н/м 3) 20 Н/м 4) 40 Н/м



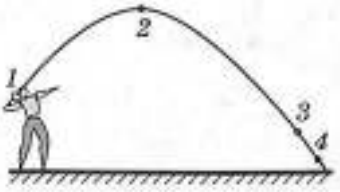
А10. На рисунке изображены графики изменения скоростей двух взаимодействующих тележек разной массы (одна тележка догоняет и толкает другую). Какую информацию о тележках содержат эти графики?

1) Тележка *1* движется сзади и имеет бóльшую массу.
2) Тележка *1* движется сзади и имеет меньшую массу.
3) Тележка *2* движется сзади и имеет бóльшую массу.
4) Тележка *2* движется впереди и имеет меньшую массу.



А11. На рисунке представлена траектория движения тела, брошенного под углом к горизонту. В какой из четырёх точек, отмеченных на траектории, кинетическая энергия тела имеет максимальное значение?

1) 1 2) 2 3) 3 4) 4



А12. Два нитяных маятника совершают свободные колебания. За одно и то же время первый маятник совершает одно колебание, а второй — четыре. Нить первого маятника

1) в 16 раз длиннее
2) в 4 раза длиннее
3) в 2 раза длиннее
4) в 2 раза короче

Раздел II. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Глава 2. Основы молекулярно-кинетической теории

§ 19. Основные положения молекулярно-кинетической теории

Повторите: строение вещества, теплота, тепловое движение частиц вещества, диффузия.

Атомы и молекулы. Предположение о том, что любое вещество состоит из мельчайших неделимых частиц — атомов, было высказано около 2500 лет назад древнегреческими философами Левкиппом и Демокритом. По их представлениям, все тела возникают в результате соединения атомов. Различия в свойствах тел объясняются тем, что тела состоят из различных атомов или одинаковые атомы по-разному соединяются между собой в пространстве.

ИНТЕРЕСНО

«Ничего не существует, кроме атомов и пустого пространства; всё прочее — мнение»; «Атомы бесконечны в числе и бесконечно различны по форме...»; «Различие всех предметов зависит от различия их атомов в числе, величине, форме и порядке; качественного различия атомов не существует». (Демокрит)

Атомистическая гипотеза широкого распространения долгое время не получала. Такие учёные, как Г. Галилей, Р. Декарт, И. Ньютон, М. В. Ломоносов, считали, что материя состоит из мельчайших неделимых частиц, и называли эти частицы корпускулами или атомами. Однако в их работах не было строгого доказательства существования атомов.

Философы Древней Греции рассматривали лишь качественную картину природных явлений, но не исследовали точные количественные закономерности. Поэтому их высказывания о природе вещей не были научной теорией.

Количественное обоснование атомистической теории было дано Джоном Дальтоном (1766—1844) (Англия), Жозефом Луи Гей-Люссаком (1778—1850) (Франция) и Амедео Авогадро (1776—1856) (Италия).

В 1803 г. Д. Дальтон, исследуя условия образования из углерода, кислорода и водорода таких соединений, как метан, этилен, углекислый газ и др., открыл *закон кратных отношений*.

ЗАКОН КРАТНЫХ ОТНОШЕНИЙ ДАЛЬТОНА Если простое вещество A соединяется с простым веществом B, образуя новые вещества C, D и т. д., то при постоянной массе вещества A отношение масс вещества B в различных продуктах реакции составляет малые целые числа.

В 1808 г. Гей-Люссак экспериментально установил закон кратных отношений для химически взаимодействующих газов.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Объёмы газов, вступающих в химическую реакцию соединения, при одинаковых значениях давления и температуры относятся как целые числа, например 1 : 2, 1 : 3 или 2 : 3.

Из этого закона следовало, что в равных объёмах любых газов при одинаковых условиях находится одинаковое число частиц. Однако некоторые опытные результаты закон объяснить не мог. Например, при соединении одного объёма хлора с одним объёмом водорода образуется не один объём хлорида водорода, а два объёма. Это противоречие было разрешено в 1811 г. А. Авогадро формулировкой двух принципов:

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ первый — все вещества, простые и сложные, образованы из молекул («составных молекул»), которые сами состоят из атомов («элементарных молекул»);
второй, который и называют собственно *законом Авогадро*.

ЗАКОН АВОГАДРО В равных объёмах любых газов при одинаковых условиях содержится одно и то же число молекул.

Измерение масс атомов и молекул. Используя атомистическую теорию строения вещества, Д. Дальтон разработал простой способ определения относительных масс атомов. Он предложил за единицу массы атомов принять массу одного атома водорода. Массу атома любого другого элемента можно найти, сравнив массу водорода с массой вещества, вступившего в химическую реакцию соединения этого элемента с водородом.

В настоящее время за единицу массы атомов и молекул принимается *атомная единица массы*.

ЗАПОМНИТЕ **Атомная единица массы (а. е. м.)** — это 1/12 часть массы атома изотопа углерода ^{12}C (с массовым числом 12):

$$1 \text{ а. е. м.} = 1{,}66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Относительная масса атомов и молекул показывает, во сколько раз масса атома или молекулы данного вещества больше 1/12 массы атома углерода ^{12}C.

Количество вещества. Мы пришли к выводу, что

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ вещество имеет *дискретную структуру*: оно состоит из мельчайших частиц, называемых *структурными элементами*.

Ими могут быть атомы, молекулы или ионы. В процессе взаимодействия этих частиц часто происходят химические реакции, причём между числом частиц разных веществ, участвующих в реакции, существуют определённые отношения.

ЗАПОМНИТЕ **Количеством вещества** принято называть физическую величину ν, пропорциональную числу частиц — структурных элементов данной системы.

Единица количества вещества — моль (моль), 1 моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов (т. е. столько частиц), сколько атомов содержится в 0,012 кг углерода ^{12}C.

ЗАПОМНИТЕ Отношение числа N атомов или молекул вещества к количеству вещества ν является постоянной величиной, называемой **постоянной Авогадро** N_A:

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

Количество вещества однородной системы равно отношению числа N структурных элементов в веществе к постоянной Авогадро N_A:

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

Молярная масса.

ЗАПОМНИТЕ **Молярной массой** M называется величина, равная отношению массы вещества m к количеству вещества ν:

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

Молярная масса выражается в килограммах на моль (кг/моль).

Масса молекулы (атома). Для определения массы m_0 молекулы (атома) нужно разделить массу m вещества на число N молекул (атомов) в нём:

$$m_0 = \frac{m}{N} = \frac{m}{\nu N_A} = \frac{M}{N_A}.$$

Таким образом, чтобы найти массу молекулы вещества, нужно знать молярную массу M вещества и постоянную Авогадро N_A. Молярную массу вещества обычно определяют химическими методами, постоянная Авогадро с высокой степенью точности определена несколькими физическими методами.

Размеры атомов и молекул. Оценить размеры атомов и молекул можно следующим образом. Согласно представлениям молекулярно-кинетической теории атомы и молекулы вещества в твёрдом или жидком состоянии расположены практически вплотную друг к другу. Поэтому объём V_0, занимаемый одной молекулой (или атомом), можно найти, разделив объём V вещества в твёрдом или жидком состоянии на число N атомов или молекул в нём:

$$V_0 = \frac{V}{N} = \frac{m}{\rho \nu N_A} = \frac{\nu M}{\rho \nu N_A} = \frac{M}{\rho N_A}.$$



М. В. Ломоносов

Диаметр молекулы вещества можно оценить путём определения минимальной толщины слоя жидкости. Такие оценки делаются в опытах по измерению площади S поверхности растекающейся жидкости известного объёма V (плёнки масла, кислоты).

Размеры отдельных молекул и их массы в настоящее время измеряются с высокой точностью. С помощью электронных и ионных микроскопов выяснен характер упаковки молекул и атомов в кристаллах. Таким образом, точные измерения с использованием современных приборов подтвердили основные положения молекулярно-кинетической теории о дискретной структуре вещества.

Природа теплоты. Важным этапом в развитии атомно-молекулярной теории строения вещества была разработка кинетической теории теплоты.

С XVII в. существовали *две гипотезы* о природе теплоты. Согласно первой теплота представляет собой особый вид материи — *теплород*. Содержание теплорода в теле определяет его температуру, процессы теплообмена обусловлены переходом теплорода из одного тела в другое. На основе представлений о теплороде сформировались такие понятия, как «количество теплоты», «теплоёмкость тела» и др.

Вторая гипотеза о природе теплоты — *корпускулярная* — объясняла все тепловые явления движением частиц, из которых состоят тела. Такие взгляды на природу теплоты высказывали английский философ Ф. Бэкон, французский учёный Рене Декарт (1596—1650). Значительный вклад в развитие и обоснование корпускулярной гипотезы о природе теплоты внёс великий русский учёный-естествоиспытатель Михаил Васильевич Ломоносов (1711—1765). В 1745 г. он дал объяснение явлений теплопроводности, плавления, испарения на основе представлений о вращательном движении частиц, из которых состоят тела.

Им был сделан вывод о существовании самой низкой температуры тела, соответствующей абсолютному покою составляющих его частиц. Однако в действительности этот вопрос оказался гораздо сложнее.

ИНТЕРЕСНО Важные эксперименты, которые заставили усомниться в существовании теплорода, были выполнены в 1798 г. английским физиком Бенджамином Румфордом (1753—1814). Он исследовал нагревание тел при трении. Так как согласно теплородной гипотезе теплота не появляется и не исчезает, а только переходит от одного тела к другому, повышение температуры трущихся тел объясняли тем, что при трении тел от них отрываются мелкие части, имеющие якобы меньшую удельную теплоёмкость, чем само тело, поэтому и выделяется теплота.

Румфорд установил, что при сверлении пушечного ствола тупым сверлом выделяется такое количество теплоты, что никакими изменениями теплоёмкости стружек этого нельзя объяснить. В специальном опыте он установил также, что удельная теплоёмкость стружек при сверлении в действительности не отличается от удельной теплоёмкости целого куска металла.

Особенно большое впечатление на современников Румфорда произвёл опыт, в котором, после того как в ящик с водой поместили пушечный ствол и начали его сверлить, через 2,5 ч вода закипела без нагрева огнём. На основании этих опытов Румфорд пришёл к выводу о несостоятельности теплородной гипотезы: «Я должен признать, что результаты всех моих экспериментов не приводят ни к какому иному выводу... что теплота не что иное, как колебательное движение частиц тела».

Тепловое движение частиц вещества. Ряд явлений природы свидетельствует о беспорядочном движении частиц вещества. Прежде всего это *диффузия*.

ЗАПОМНИТЕ **Диффузией** называется явление взаимного проникновения одного вещества в другое при контакте тел.

Так, капля чернил (или марганцовки) очень быстро расплывается в стакане с водой, и самопроизвольно образуется вполне однородный раствор. Легко растворяются в воде многие соли, например поваренная соль, медный купорос, перманганат калия и т. п. Хорошо диффундируют в воде сахар, спирты, кислоты.

Очень быстро диффундируют газы, образуя однородную смесь независимо от их плотности. Например, плотность кислорода в 1,14 раза, а плотность углекислого газа в 1,57 раза больше плотности азота, но в атмосферном воздухе они образуют однородную смесь.

Труднее всего идёт диффузия в твёрдых телах. Но и здесь опыты показали, что если хорошо очистить поверхности двух металлов (например, меди и серебра), плотно прижать их друг к другу и оставить в таком состоянии длительное время, то в каждом из соприкасающихся слоёв обнаруживаются атомы другого металла.

Наиболее наглядным экспериментальным подтверждением представлений молекулярно-кинетической теории о беспорядочном тепловом движении атомов и молекул является *броуновское движение*.

ЗАПОМНИТЕ **Броуновским движением** называется движение мелких частиц, взвешенных в жидкости или газе.

Броуновское движение во многом сходно с диффузионным движением молекул и атомов.

Беспорядочное движение мелких твёрдых частиц, находящихся в жидкости или газе, впервые в 1827 г. обнаружил при наблюдении в микроскоп английский ботаник Роберт Броун (1773—1856).

Это явление смогла объяснить лишь молекулярно-кинетическая теория на основе представлений о дискретном строении вещества и беспорядочном тепловом движении молекул (атомов). Молекулы жидкости или газа сталкиваются с твёрдой частицей и изменяют направление и модуль скорости её движения. Число молекул, ударяющих частицу с различных сторон, и направление передаваемого ими импульса непостоянны во времени. Чем меньше размеры и масса частицы, тем более заметными становятся изменения её импульса во времени.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Факт существования броуновского движения свидетельствует о дискретном строении вещества и беспорядочном движении молекул.

Атомы. Молекулы. Закон Авогадро. Число Авогадро. Атомная единица массы. Молярная масса. Броуновское движение

1. Как объясняли разнообразие всех тел в природе древнегреческие атомисты? 2. Какое открытие сделал Д. Дальтон и каким образом это открытие обосновывает атомистическую гипотезу? 3. Какие трудности возникли для атомистической гипотезы при исследовании химических соединений веществ в газообразном состоянии? 4. Как разрешил эти трудности Авогадро? 5. В чём состоит закон Авогадро? 6. Что такое количество вещества? 7. В каких единицах выражается количество вещества? 8. Что такое постоянная Авогадро? В каких единицах она выражается? 9. Что такое молярная масса? 10. С помощью каких экспериментальных методов были определены размеры молекул? 11. Что такое атомная единица массы и чему она равна? 12. Какие взгляды на природу теплоты были в науке до утверждения кинетической теории тепловых явлений? 13. Какие опытные факты служат обоснованием молекулярно-кинетической теории? 14. О чём свидетельствует броуновское движение?

ЗАДАЧА 1. В опытах было получено, что в герметичном сосуде, в который помещён радий массой 1 г, за год при нормальных условиях накапливается газообразный гелий объёмом 0,156 см^3. Исходя из этих данных, определите, сколько атомов гелия находится в сосуде объёмом 22,4 дм^3 при нормальных условиях, если известно, что радий массой 1 г испускает за 1 с $1{,}48 \cdot 10^{11}$ α-частиц.

Решение. При одинаковых условиях отношение числа атомов гелия равно отношению объёмов гелия: $\frac{N}{N_1} = \frac{V}{V_1}$, откуда $N_1 = \frac{NV_1}{V}$.

Общее число атомов гелия, выделившихся за год, $N = nt$.

Отсюда искомое число N_1 атомов равно:

$$N_1 = \frac{ntV_1}{V} = \frac{1{,}48 \cdot 10^{11} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 2{,}24 \cdot 10^{-2}}{1{,}56 \cdot 10^{-7}} = 6{,}7 \cdot 10^{23}.$$

ЗАДАЧА 2. Оцените радиус атома алюминия ($\rho = 2{,}7 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $M = 2{,}7 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$), приняв, что в алюминии, находящемся в твёрдом состоянии, атомы располагаются вплотную друг к другу.

Решение. Сначала нужно найти объём V_0, занимаемый одним атомом алюминия. Для этого разделим объём $V_м$, занимаемый алюминием, взятым в количестве 1 моль, на число атомов алюминия в одном моле:

$$V_0 = \frac{V_м}{N_A} = \frac{M}{\rho N_A} = \frac{2{,}7 \cdot 10^{-2}}{2{,}7 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{23}} (\text{м}^3) \approx 1{,}7 \cdot 10^{-29}\ \text{м}^3.$$

Длина l ребра куба, занимаемого атомом,

$$l = \sqrt[3]{V_0} = \sqrt[3]{1{,}7 \cdot 10^{-29}}\ \text{м}^3 \approx 2{,}6 \cdot 10^{-10}\ \text{м}.$$

Считая атом алюминия шаром, вписанным в этот куб, получим, что радиус атома алюминия равен половине ребра этого куба: $r = \frac{l}{2} \approx 1{,}3 \cdot 10^{-10}$ м.

РЕШИТЕ

19.1. Сколько молекул кислорода содержится в воздухе массой 1 г?

19.2. Сколько атомов водорода содержится в воде массой 100 г?

19.3. Какое количество вещества содержится в воде массой 200 г?

19.4. Какое количество вещества попадает на экран телевизора за 1 с, если сила тока в электронном луче 10^{-4} А? Заряд одного электрона равен $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

19.5. Оцените диаметр молекулы воды.

19.6. В опыте по оценке размеров молекул был использован 0,15%-ный раствор олеиновой кислоты в спирте. При выливании раствора массой $6 \cdot 10^{-6}$ кг на поверхность воды, покрытую тальком, образовалось пятно площадью $1{,}5 \cdot 10^{-2}$ м^2. Считая слой олеиновой кислоты мономолекулярным, оцените размеры молекулы. Молярная масса олеиновой кислоты 0,282 кг/моль, плотность 895 кг/м^3.

19.7. Вычислите массы молекул водорода и кислорода, если их молярные массы соответственно равны $2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль и $3{,}2 \cdot 10^{-2}$ кг/моль.

19.8. Объём воды в Тихом океане приблизительно равен $7 \cdot 10^8$ км^3. Представьте себе, что в океан вылит стакан воды и вся вода в океане хорошо перемешалась. Сколько молекул воды из тех, что были в стакане, снова попадут в стакан при повторном зачерпывании из океана? Объём стакана равен 200 мл.

1. Поместите в стакан пакетик с чаем, понаблюдайте за окрашиванием воды в стакане.

2. Понаблюдайте за явлением диффузии в воздухе. Для проведения эксперимента поместите на гладкой поверхности каплю крахмала немного вытянутой формы, а на расстоянии 2—3 см от неё каплю йода (см. рис.). Вооружитесь линейкой и секундомером. Определите скорость окрашивания вещества.



3. Измерьте размеры капли масла. Для этого возьмите плоский сосуд большого размера и налейте в него воды, затем поместите на его поверхности каплю синтетического масла (такое масло используют для смазывания двигателя автомобиля). Масло растечётся по поверхности воды в виде мономолекулярного слоя. Измерьте размер пятна. Самостоятельно придумайте, как определить размер молекулы масла. Аналогичный эксперимент проведите с минеральным маслом (например, с вазелиновым и т. д.).

Проанализируйте результаты измерений размеров капель этих масел. Одинаковы ли они? Выясните, чем отличается синтетическое масло от минерального.

1. Особенности процесса диффузии в жидкости и газе.
2. Возможные способы измерения масс молекул и атомов.
3. Особенности строения молекул синтетического и минерального масел.

§ 20. Эксперименты, лежащие в основе молекулярно-кинетической теории

Повторите: броуновское движение.

Для принятия теоретической гипотезы в качестве научной физической теории недостаточно её полного согласия со всеми уже известными опытными фактами, так как именно эти факты и лежат в основе гипотезы.

Важным этапом превращения гипотезы в научную теорию является предсказание новых, неизвестных ранее фактов.

ЗАПОМНИТЕ Подтверждение на опыте предсказанного факта называют **решающим экспериментом.**

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Если предсказанные теорией новые физические закономерности или явления экспериментально подтверждаются, то результаты опыта служат доказательством правильности теории.

Закономерности броуновского движения. Важную роль в подтверждении справедливости молекулярно-кинетической теории сыграли опыты французского физика Жана Перрена (1870—1942) по изучению количественных закономерностей броуновского движения, выполненные в 1908—1911 гг. Эти опыты были поставлены после того, как А. Эйнштейн в 1905 г. на основе молекулярно-кинетической теории разработал теорию броуновского движения. А. Эйнштейн доказал, что при хаотичном движении броуновской частицы[1] её смещение от начального положения должно подчиняться закону $\overline{\Delta x^2} = \frac{bT\Delta t}{N_A}$, где $\overline{\Delta x^2}$ — средний квадрат смещения броуновской частицы за время Δt; b — постоянная, зависящая от формы и размеров броуновской частицы; N_A — постоянная Авогадро; T — абсолютная температура (см. § 22).

Наблюдения Перрена полностью подтвердили этот теоретический результат.

Распределение молекул по скоростям. Развитию молекулярно-кинетической теории газов способствовала работа английского физика Дж. Максвелла «Пояснения к динамической теории газов» (1860).

В этой работе Максвелл пришёл к фундаментальному выводу.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Молекулы газа движутся с различными скоростями (ранее скорости молекул считали одинаковыми). При столкновении молекул направления и модули векторов их скоростей изменяются, но распределение молекул по возможным значениям скоростей остаётся неизменным.

Исходя из основных положений молекулярно-кинетической теории, Дж. Максвелл вывел закон распределения молекул газа по скоростям.

[1] Броуновскими частицами называются мелкие частицы, участвующие в тепловом движении и наблюдаемые в микроскоп.

Проанализируем график, иллюстрирующий максвелловское распределение молекул по скоростям (рис. 2.1). Линия синего цвета характеризует распределение молекул по скоростям при низкой температуре, а чёрного — при более высокой температуре. На оси абсцисс отложен модуль скорости, на оси ординат — относительное число молекул, скорости которых лежат в интервале значений от v до $v + \Delta v$.

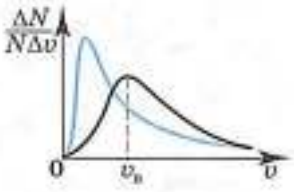


Рис. 2.1

ЗАПОМНИТЕ Скорость $v_в$, значение которой близко к значениям скоростей, с которыми движется значительное число молекул, называется **наиболее вероятной скоростью.**

Эта скорость зависит от температуры вещества: она уменьшается с понижением температуры. На графике наиболее вероятной скорости соответствует максимум.

Хотя молекулы могут двигаться с любыми скоростями, фактически число молекул, скорость которых значительно отличается от наиболее вероятной, весьма мало. Нулю равно число молекул, скорость которых равна нулю, — это значит, что в веществе нет покоящихся молекул. Число молекул, скорость которых в три раза больше наиболее вероятной, тоже близко к нулю — это значит, что ничтожно мала вероятность того, что молекула приобретёт скорость, значительно превышающую наиболее вероятную скорость.

Наконец, с понижением температуры число быстро движущихся молекул уменьшается, а число медленно движущихся возрастает. Максимум кривой распределения смещается влево, и кривая становится более острой.

Наиболее вероятная скорость движения молекул газа по предсказаниям теории при температуре около 0 °С должна быть равна нескольким сотням метров в секунду (для молекул водорода — 1500 м/с, кислорода — 380 м/с и т. д.). Этот вывод как будто свидетельствует против теории, так как противоречит факту малой скорости диффузии газов, например при распространении запахов в воздухе.

Прямые измерения скоростей теплового движения молекул были выполнены в 1920 г. немецким физиком-экспериментатором Отто Штерном (1888—1969) в опытах с молекулярными пучками. В качестве исследуемого газа учёный использовал пары серебра. Серебро испарялось в вакууме с поверхности платиновой проволоки, нагреваемой электрическим током. На пути атомов серебра ставили цилиндрический экран радиусом R_A с узкой щелью. Атомы серебра, пролетевшие сквозь щель, осаждались на стенке другого цилиндра радиусом R_B, образуя узкую полоску около точки M_0. При вращении прибора вокруг оси, совпадающей с платиновой проволокой, атомы серебра попадали на стенки цилиндра в новое место M (рис. 2.2). По смещению полоски и известной угловой скорости вращения прибора можно было вычислить скорость движения атомов серебра.

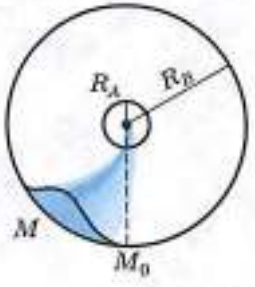


Рис. 2.2

В самом деле, за время $t = \frac{R_B - R_A}{v}$, в течение которого атом серебра движется от щели до наружного цилиндра, прибор повернётся на угол $\varphi = \omega t$. Поэтому атом попадёт уже не в точку M_0, а в точку M, т. е. полоска сместится на длину дуги $\overset{\frown}{M_0M} = R_B\varphi = R_B\omega t = \frac{R_B\omega(R_B - R_A)}{v}$.

Измерив длину дуги $\overset{\frown}{M_0M} = l$ и зная радиусы цилиндров и частоту вращения прибора, можно определить скорость движения атомов серебра:

$$v = \frac{R_B\omega(R_B - R_A)}{l}. \qquad (20.1)$$

Найденная таким образом скорость движения атомов серебра совпала со скоростью, рассчитанной по законам молекулярно-кинетической теории.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ В опыте Штерна наблюдалось не только смещение, но и размытие полоски из атомов серебра. Это доказывало, что скорости атомов в пучке, вышедшем из щели, разные. Если бы скорость всех атомов была одинаковой, наблюдалось бы только смещение серебряной полоски. Между тем, как видно из выражения (20.1), атомы, смещающиеся на меньшее расстояние, движутся быстрее, чем атомы, смещающиеся на большее расстояние.

На рисунке 2.2 показано, как зависит толщина слоя серебра от места конденсации атомов, а значит, как зависит число атомов в этом месте от их скорости. Опыт Штерна хорошо согласовывался с распределением молекул по скоростям, вычисленным Дж. Максвеллом.

Наиболее вероятная скорость. Средний квадрат смещения. Распределение по скоростям. Опыт Броуна. Опыты Перрена

1. Какие опыты из рассмотренных в этом параграфе можно отнести к основным? 2. Какие следствия молекулярно-кинетической теории были подтверждены в опытах Перрена? 3. Каким способом можно измерить скорость движения молекул газа? 4. Как можно опытным путём исследовать распределение молекул газа по скоростям? 5. На рисунке 2.3 изображены результаты наблюдений за движением броуновской частицы. Является ли полученная ломаная линия траекторией движения броуновской частицы?



Рис. 2.3

Исследуйте с помощью микроскопа броуновское движение. Для этого растворите в воде немного акварельной краски, а затем на предметное стекло поместите каплю полученной суспензии. Подберите такое количество краски в суспензии, чтобы частиц было не очень много. Понаблюдайте за частицами краски. Подождите минуту и снова понаблюдайте за частицами краски. Поскольку капля имеет некоторый объём, с помощью микрометрического винта изменяйте высоту объектива и качественно сравните количество частиц на разных высотах.

1. Распределение, которому подчиняются броуновские частицы.
2. Влияние температуры на скорость и перемещение броуновских частиц.

§ 21. Свойства газов

Повторите: импульс, давление, плотность, концентрация.

При создании кинетической теории газов за её основу были приняты следующие экспериментально установленные факты, полученные в опытах с достаточно разреженными газами.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Газы способны неограниченно расширяться и занимать любой предоставленный им объём.

ЗАКОН ДАЛЬТОНА Смесь газов оказывает на стенки сосуда давление, равное сумме давлений каждого из газов, взятых в отдельности:

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \ldots + p_n.$$

ЗАКОН БОЙЛЯ–МАРИОТТА При постоянной температуре давление газа данной массы обратно пропорционально его объёму:

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

ЗАКОН ШАРЛЯ При постоянном объёме давление газа данной массы линейно зависит от температуры:

$$p = p_0(1 + \alpha t),$$

где p — давление газа при температуре t; p_0 — давление газа при 0 °C; α — температурный коэффициент давления, одинаковый для всех газов и по современным измерениям равный

$$\alpha = \frac{1}{273{,}15}\,^{\circ}\text{C}^{-1} = 0{,}003661\,^{\circ}\text{C}^{-1}.$$

ЗАКОН ГЕЙ-ЛЮССАКА При постоянном давлении объём газа данной массы линейно зависит от температуры:

$$V = V_0(1 + \alpha t),$$

где V — объём газа при температуре t; V_0 — объём газа при 0 °C; α — температурный коэффициент объёмного расширения, одинаковый для всех газов и равный температурному коэффициенту давления.

Идеальный газ. Первым шагом на пути построения физической теории может быть создание мысленной модели объекта.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Любая мысленная модель реального объекта обязательно является упрощением действительности и поэтому имеет определённые границы применимости, в пределах которых она может использоваться для описания известных свойств и предсказания новых, ранее неизвестных следствий теории.

Примером модели, использованной для теоретического объяснения свойств газов, может служить модель идеального газа.

М. В. Ломоносов считал, что вещества состоят из корпускул, находящихся во вращательном движении, температура тела связана с вращательным движением этих корпускул.

Английский физик Джеймс Джоуль (1818—1889) в 1852 г. предложил более точную модель, приписав молекулам газа поступательное движение. При этом он считал, что скорости всех молекул одинаковы. На основе этих предположений он теоретически вывел закон Бойля—Мариотта, вычислил скорость теплового движения молекул, определил значение абсолютного нуля.

В 1857 г. немецкий физик Рудольф Клаузиус (1822—1888), используя модель идеального газа, впервые систематически изложил кинетическую теорию газов. Он ввёл понятия о средних величинах, длине свободного пробега молекул, вычислил давление газа на стенки сосуда и среднюю длину пути между двумя столкновениями молекул.

ЗАПОМНИТЕ **Идеальным газом** Клаузиус назвал газ, удовлетворяющий следующим условиям:

1) объёмом всех молекул газа можно пренебречь по сравнению с объёмом сосуда, в котором этот газ находится;
2) время столкновения молекул друг с другом пренебрежимо мало по сравнению со временем между двумя столкновениями (т. е. временем свободного пробега молекулы);
3) молекулы взаимодействуют между собой только при непосредственном соприкосновении, при этом они отталкиваются;
4) силы притяжения между молекулами идеального газа ничтожно малы, и ими можно пренебречь.

Исходя из этих условий, Клаузиус смог вывести все свойства идеального газа и установить соотношения между его микроскопическими и макроскопическими параметрами.

ЗАПОМНИТЕ **Микроскопическими параметрами** газа называют индивидуальные характеристики молекул.

К их числу относятся масса молекулы, её скорость, импульс и кинетическая энергия поступательного движения.

ЗАПОМНИТЕ Параметры газа как физического тела называются **макроскопическими**.

К ним относятся температура, объём и давление газа. Одной из важнейших задач молекулярно-кинетической теории было установление связи между макроскопическими и микроскопическими параметрами газа.

Давление идеального газа. Используя модель идеального газа, вычислим давление газа на стенку сосуда. Пусть в сосуде произвольной формы находится идеальный газ с концентрацией молекул $n = N/V$, где N — общее число молекул, V — объём сосуда.

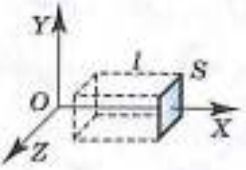


Рис. 2.4

Для упрощения задачи предположим, что все молекулы имеют одинаковую массу m_0, в сосуде находится одно вещество, т. е. один сорт молекул, и все молекулы обладают скоростями, различными по направлению, но одинаковыми по модулю. Выберем на стенке сосуда малый участок площадью S и направим оси координат так, как показано на рисунке 2.4. Поскольку молекулы движутся

беспорядочно, то можно считать, что в положительном направлении оси OX движется одна шестая часть всех молекул. Это справедливо и для положительных направлений осей OY и OZ.

Удар молекулы о стенку будем считать упругим (при строгом рассмотрении можно заметить, что конечный результат не зависит от характера соударения молекулы со стенкой). При упругом ударе о стенку импульс молекулы меняется на противоположный, следовательно, изменение импульса равно:

$$\Delta(m_0 v_x) = -m_0 v_x - m_0 v_x = -2m_0 v_x.$$

За время Δt к стенке подлетят все молекулы, расположенные в параллелепипеде с основанием S и боковым ребром $l = v_x \Delta t$ (см. рис. 2.4). Число этих молекул

$$N = \frac{1}{2} nSl = \frac{1}{2} nSv_x \Delta t.$$

Изменение их импульса

$$N\Delta(m_0 v_x) = -2m_0 v_x \frac{1}{2} nSv_x \Delta t.$$

Следовательно, суммарная средняя сила, действующая на молекулы на данном участке, будет по модулю равна

$$F_x = \frac{N\Delta(m_0 v_x)}{\Delta t}.$$

На стенку согласно третьему закону Ньютона действует сила $\vec{F}$, равная по модулю и противоположная по направлению силе $\vec{F}_x$: $F = -F_x$. Отсюда

$$F = nSm_0 v_x^2.$$

Так как все направления для векторов скоростей молекул равновероятны, средние значения квадратов модулей их проекций на координатные оси равны между собой:

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}.$$

Отсюда следует, что

$$v^2 = 3\overline{v_x^2},$$

и для давления газа на стенку сосуда получаем

$$p = \frac{F}{S} = \frac{1}{3} nm_0 v^2 = \frac{2}{3} n \frac{m_0 v^2}{2}. \qquad (21.1)$$

Учитывая, что на самом деле согласно распределению Максвелла (см. § 20) молекулы движутся с разными скоростями, мы должны в выражение (21.1) вместо квадрата скорости подставить *среднее значение квадрата скорости всех молекул*:

$$\overline{v^2} = \frac{1}{N}(v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \ldots + v_N^2).$$

Окончательно получим

$$p = \frac{1}{3} nm_0 \overline{v^2} = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{2}{3} n\overline{E}_k. \qquad (21.2)$$

ЗАПОМНИТЕ Уравнение (21.2), устанавливающее связь между давлением p идеального газа, массой m_0 молекулы, концентрацией n молекул и средним значением квадрата скорости $\overline{v^2}$, называется **уравнением Клаузиуса** или **основным уравнением молекулярно-кинетической теории газов.**

Величина

$$\overline{E_k} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$$

есть **средняя кинетическая энергия молекул**, а величина

$$v_{кв} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{2\overline{E_k}/m_0} —$$

средняя квадратичная скорость молекул.

Из уравнения (21.2) следует, что давление идеального газа равно 2/3 произведения концентрации n молекул на среднее значение кинетической энергии $\overline{E_k}$ хаотичного поступательного движения молекул.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ С помощью модели идеального газа была установлена связь одного макроскопического параметра газа — его давления на стенки сосуда — с микроскопическими параметрами — массой молекулы, концентрацией молекул и средним значением квадрата скорости их хаотичного (теплового) движения, или средним значением кинетической энергии теплового движения молекул.

Выразив плотность вещества через концентрацию n молекул и массу m_0 молекулы: $\rho = nm_0$, можно получить ещё одно уравнение для вычисления давления газа:

$$p = \frac{1}{3}\rho\overline{v^2}. \qquad (21.3)$$

Идеальный газ. Давление идеального газа. Уравнение Клаузиуса. Средняя квадратичная скорость

1. Почему газы способны неограниченно расширяться? 2. Как можно объяснить закон Дальтона для давления смеси газов? 3. Как связаны давление и объём газа при постоянной температуре? 4. Как зависит давление газа от температуры при постоянном объёме? 5. Как зависит объём газа от температуры при постоянном давлении? 6. Что такое идеальный газ? 7. Какую величину называют средней квадратичной скоростью? 8. Какие упрощающие предположения были использованы при выводе основного уравнения молекулярно-кинетической теории для идеального газа?

ЗАДАЧА 1. Считая воздух газом, состоящим из одинаковых молекул, оцените скорость теплового движения молекул газа при нормальных условиях.

Решение. Применим уравнение (21.3), устанавливающее связь давления газа с его плотностью и средним значением квадрата скорости. Из этого уравнения для средней квадратичной скорости молекул газа получим выражение

$$v_{кв} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}},$$

Давление воздуха при нормальных условиях равно примерно $1{,}01 \cdot 10^5$ Па, плотность равна 1,29 кг $\cdot$ м$^{-3}$. Подставляя эти значения, получаем

$$v_{кв} = \sqrt{\frac{1{,}01 \cdot 10^5}{1{,}29}}\ (\text{м/с}) = 280\ \text{м/с}.$$

ЗАДАЧА 2. Считая водород в солнечной фотосфере (внешней видимой оболочке Солнца) идеальным газом, определите среднюю кинетическую энергию атомов водорода. Концентрация атомов водорода в фотосфере равна примерно $1{,}6 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$, давление равно примерно $1{,}25 \cdot 10^2$ Па.

Решение. Связь между давлением идеального газа, концентрацией и средней кинетической энергией теплового движения частиц выражается основным уравнением молекулярно-кинетической теории (21.2). Отсюда для средней кинетической энергии атомов водорода получим $\overline{E}_k = \frac{3p}{2n}$.

Вычисления дают $\overline{E}_k = \frac{3 \cdot 1{,}25 \cdot 10^2}{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{21}}\ (\text{Дж}) = 1{,}2 \cdot 10^{-19}$ Дж.

РЕШИТЕ

21.1. Масса молекулы водорода равна $3{,}3 \cdot 10^{-27}$ кг. Считая водород идеальным газом, вычислите его давление на стенки сосуда при концентрации 10^{25} м$^{-3}$ и средней квадратичной скорости теплового движения молекул 700 м/с.

21.2. Концентрация молекул межзвёздного газа в среднем равна 1 м$^{-3}$, средняя кинетическая энергия молекул газа равна $1{,}5 \cdot 10^{-21}$ Дж. Определите давление межзвёздного газа.

21.3. Определите среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул идеального газа с концентрацией $3 \cdot 10^{25}$ м$^{-3}$ при давлении 10^5 Па.

21.4. Концентрации молекул идеального газа и их средние квадратичные скорости в двух сосудах одинаковы. Масса молекулы газа во втором сосуде в два раза больше, чем в первом. Чему равно отношение давлений p_1/p_2?

21.5. Чему равна концентрация молекул воздуха в колбе радиолампы, если давление внутри колбы равно 10^{-5} Па, а средняя кинетическая энергия молекул воздуха равна $5 \cdot 10^{-21}$ Дж?

1. Основные особенности модели газа, которую мы называем идеальным газом.
2. Влияние температуры на давление и объём газа.

§ 22. Температура и способы её измерения

Повторите: температура, термометр, термометры газовый и жидкостный.

Температура. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа устанавливает связь легко измеряемого макроскопического параметра — давления с такими микроскопическими параметрами газа, как средняя кинетическая энергия и концентрация молекул. Но, измерив давление газа, мы не сможем узнать по отдельности ни среднее значение кинетической энергии молекул, ни их концентрацию. Следовательно, для нахождения микроскопических параметров газа нужны измерения ещё какой-то физической величины, связанной либо с концентрацией, либо со средней кинетической энергией молекул.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Ещё в XVIII в. М. В. Ломоносов высказал предположение о том, что изменение скорости хаотичного движения молекул связано с изменением *температуры* тела.

Понятие температуры тела представляется на первый взгляд простым и понятным. Из собственного повседневного опыта каждый знает, что тела могут быть горячими и холодными. Ещё с детства нам знакомы выражения «температура на улице», «температура при заболевании» и т. п.

Опыты и наблюдения показывают, что при контакте двух тел, из которых одно мы воспринимаем как горячее, а другое — как холодное, происходят изменения физических параметров как первого, так и второго тела.

ЗАПОМНИТЕ Процесс передачи энергии, происходящий при контакте горячего и холодного тел и сопровождающийся изменениями ряда физических параметров, называется **теплопередачей**.

Через некоторое время после установления контакта между любыми телами изменения макроскопических параметров тел прекращаются.

ЗАПОМНИТЕ Состояние тел, при котором их макроскопические параметры не изменяются, называется **тепловым равновесием**.

Во всех частях системы тел, находящихся в состоянии теплового равновесия, температура одинакова. Если при контакте двух тел никакие их физические параметры, например объём, давление, не изменяются, то между телами нет теплопередачи и их температура одинакова.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Температура как макроскопический физический параметр определяет возможность теплопередачи от одного тела к другому и направление теплопередачи.

Жидкостный термометр. В повседневной жизни наиболее часто применяется способ измерения температуры с помощью жидкостного термометра, использование которого основано на свойстве жидкостей расширяться при на-

гревании. В качестве рабочего тела обычно используют ртуть (для измерения температур от −35 до 750 °С), спирт (от −80 до 70 °С), пентан (от −200 до 35 °С). Для измерения температуры тела термометр приводят с ним в контакт, между телом и термометром осуществляется процесс теплопередачи до установления теплового равновесия. Чтобы процесс измерения не изменил заметно температуру тела, масса термометра должна быть значительно меньше массы тела, температура которого измеряется.

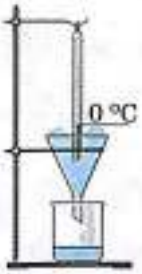


Рис. 2.5

Изменение объёма жидкости в термометре прекращается, когда между телом и термометром прекращается теплопередача. При этом температура жидкости в термометре равна температуре тела.

Отметив на трубке термометра положение конца столбика жидкости при помещении термометра сначала в тающий лёд (рис. 2.5), а затем в кипящую воду (рис. 2.6) при нормальном давлении и разделив отрезок между этими отметками на 100 равных частей, получают температурную шкалу по Цельсию (Международную практическую шкалу температур). Здесь в качестве первичных (основных) точек температурной шкалы приняты температура таяния льда при нормальном атмосферном давлении (101 325 Па) и температура кипения воды при тех же условиях. Их значения 0 °С и 100 °С.

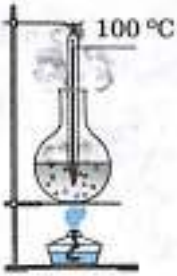


Рис. 2.6

ЗАПОМНИТЕ Единица температуры в Международной практической шкале температур называется **градусом Цельсия** — 1 °С.

Существенным недостатком рассмотренного способа измерения температуры с помощью жидкостных термометров является то, что понятие температуры при этом оказывается связанным с конкретными физическими свойствами определённого вещества, используемого в качестве рабочего тела в термометре, — ртути, спирта и т. п. Изменение объёмов различных жидкостей при одинаковом нагревании оказывается несколько различным. Поэтому ртутный и спиртовой термометры, показания которых совпадают при 0 °С и 100 °С, дают несколько разные показания при других температурах. Следовательно,

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ обнаруживаемые в опытах зависимости каких-либо физических величин от температуры, определяемой по жидкостному термометру, могут быть связаны с особенностями изменения объёма жидкости при нагревании.

Газовый термометр. В конце XVIII в. Шарль установил, что одинаковое нагревание любого газа приводит к одинаковому повышению давления, если при этом объём остаётся постоянным. При измерении температуры по шкале Цельсия зависимость давления газа от температуры при постоянном объёме (закон Шарля, см. § 21) выражается линейным законом

$$p = p_0(1 + \alpha t), \qquad (22.1)$$

а отсюда следует, что давление газа (при V = const) можно принять в качестве количественной меры температуры. Соединив сосуд, в котором находится газ, с манометром и проградуировав прибор, можно измерять температуру по показаниям манометра (рис. 2.7).

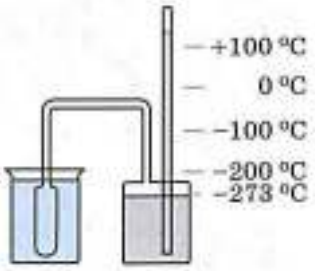


Рис. 2.7

ЗАПОМНИТЕ Прибор для измерения температуры, принцип действия которого основан на законе Шарля, называется **газовым термометром**.

В широких пределах изменений концентрации газов и температур и при малых давлениях температурный коэффициент давления разных газов примерно одинаковый, поэтому способ измерения температуры с помощью газового термометра оказывается малозависящим от свойств конкретного вещества, используемого в термометре в качестве рабочего тела. Наиболее точные результаты получаются, если в качестве рабочего тела использовать водород или гелий.

Абсолютная температурная шкала (термодинамическая шкала температур). Выбор в качестве первичных (основных) точек температурной шкалы точек таяния льда и кипения воды совершенно произволен. Полученная таким образом температурная шкала оказалась неудобной для теоретических исследований. В связи с этим появилась необходимость в построении другой температурной шкалы, не так тесно связанной со свойствами какого-то одного конкретного вещества. Так появилась *абсолютная температурная шкала*, которая в настоящее время называется *термодинамической шкалой температур*.

ИНТЕРЕСНО Впервые термодинамическую шкалу предложил в 1848 г. У. Томсон (лорд Кельвин), по его имени эту шкалу иногда называют шкалой Кельвина. При построении этой шкалы он исходил из законов термодинамики.

Упрощённо понятие абсолютной температуры можно ввести следующим образом. Из выражения (22.1) следует, что, если вещество до температуры −273,15 °C остаётся в газообразном состоянии, его давление при этой температуре должно стать равным нулю. Эту температуру приняли за начало отсчёта новой температурной шкалы — *абсолютный нуль*, а за единицу температуры по абсолютной шкале приняли 1 кельвин (К), равный 1 °C.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Связь между температурой t по шкале Цельсия и температурой T по шкале Кельвина, отсчитываемой от абсолютного нуля и называемой *абсолютной температурой*, определяется выражениями

$$t = T - T_0, \quad (22.2)$$

$$T = t + T_0, \quad (22.3)$$

где символом T_0 обозначена абсолютная температура, соответствующая температуре 0 °C и равная 273,15 К.

Очевидно также, что нуль по абсолютной шкале (абсолютный нуль) равен −273,15 °С.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Абсолютный нуль — это *предельно низкая температура*. Никакими экспериментами достичь абсолютного нуля невозможно — это один из основных законов природы.

Чем ближе температура охлаждаемого тела к абсолютному нулю, тем труднее идёт дальнейшее охлаждение. В настоящее время с помощью весьма сложных методов удалось достичь самой низкой на практике температуры, равной примерно 10^{-10} К.

Из уравнений (22.1) и (22.2) следует, что при постоянном объёме связь давления идеального газа с температурой по абсолютной шкале определяется выражением

$$p = p_0(1 + \alpha(T - T_0)) = p_0\alpha T. \qquad (22.4)$$

Температура как мера средней кинетической энергии молекул. Из выражения (22.4), являющегося определением понятия абсолютной температуры, и основного уравнения молекулярно-кинетической теории газов (21.2) можно найти связь между средней кинетической энергией теплового движения молекул идеального газа и абсолютной температурой газа:

$$E = \frac{3}{2}\frac{p}{n} = \frac{3}{2}\frac{p_0\alpha T}{n}. \qquad (22.5)$$

На основе представлений молекулярно-кинетической теории можно доказать, что

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ при постоянной температуре средняя кинетическая энергия теплового движения молекул идеального газа имеет постоянное значение независимо от давления и объёма газа.

Следовательно, отношение p/n является постоянной величиной и можно ввести обозначение

$$\frac{p_0\alpha}{n} = k, \qquad (22.6)$$

Тогда из выражений (22.5) и (22.6) получаем

$$E = \frac{3}{2}kT, \qquad (22.7)$$

где коэффициент k называется *постоянной Больцмана*.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Средняя кинетическая энергия теплового движения молекул идеального газа пропорциональна первой степени абсолютной температуры газа.

Численное значение постоянной Больцмана равно:

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

Мы получили, что температура тела, измеряемая с помощью макроскопического прибора — термометра, имеет в молекулярно-кинетической теории

смысл микроскопического параметра, являясь величиной, прямо пропорциональной средней кинетической энергии хаотичного движения молекул.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ В молекулярной физике можно с равным основанием измерять энергию теплового движения атомов или молекул в кельвинах или джоулях. Постоянная Больцмана имеет физический смысл переводного множителя для перевода единицы энергии — джоуля в единицу температуры — кельвин.

Используя выражения (21.2) и (22.7), зависимость давления идеального газа от абсолютной температуры можно записать так:

$$p = nkT. \qquad (22.8)$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Давление идеального газа прямо пропорционально концентрации молекул и абсолютной температуре газа.

Теплопередача. Тепловое равновесие. Абсолютная температурная шкала

1. По какому признаку можно судить о равенстве температур двух тел? 2. На каком свойстве жидкостей основано измерение температуры с помощью ртутного и спиртового термометров? 3. Как строится шкала температур по Цельсию? Что принято за первичные (основные) точки этой шкалы? 4. В чём недостатки жидкостных термометров? 5. Как устроен газовый термометр? 6. В чём преимущество газового термометра перед жидкостным? 7. Как строится абсолютная температурная шкала? Что принято за единицу абсолютной (термодинамической) температуры? 8. Каково соотношение между температурами по шкале Цельсия и шкале Кельвина? 9. Какую связь устанавливает молекулярно-кинетическая теория между абсолютной температурой идеального газа и средней кинетической энергией хаотичного движения его молекул?

ЗАДАЧА. Основываясь на представлениях молекулярно-кинетической теории, оцените давление и температуру внутри Солнца. Масса Солнца $M_C = 2 \cdot 10^{30}$ кг, радиус $R_C = 7 \cdot 10^8$ м. Для простоты расчётов предположите, что Солнце состоит в основном из атомарного водорода.

Решение. Согласно молекулярно-кинетической теории давление p газа связано с его температурой T и концентрацией n молекул соотношением $p = nkT$, отсюда $T = \frac{p}{nk}$.

Поскольку Солнце не расширяется и не сжимается, давление его внутренних слоёв на любой глубине равно давлению внешних слоёв, создаваемому силой тяжести F. Отсюда следует, что для определения температуры на какой-то глубине внутри Солнца необходимо найти концентрацию n атомов на этой глубине и давление p вышележащих слоёв.

Для упрощения будем определять температуру на расстоянии $R_C/2$ от центра Солнца, где концентрацию атомов водорода будем считать приближённо равной среднему значению для Солнца: $n \approx n_{ср} = \frac{\rho_{ср} N_A}{M}$, где $M = 10^{-3}$ кг/моль — молярная масса атомарного водорода.

Выделим вертикальный столб газа с площадью основания S; давление верхних слоёв на лежащие ниже в этом столбе можно оценить, пренебрегая зависимостью плотности газа от глубины. Примем расстояние от центра Солнца до центра масс верхней половины столба газа равным $\frac{3}{4}R_C$ и рассчитаем силу тяготения, учитывая, что этот слой притягивается веществом, находящимся внутри слоя на расстоянии, меньшем $\frac{3}{4}R_C$ (его масса равна $M_1 = \frac{M_C\left(\frac{3}{4}R_C\right)^3}{R_C^3} = \frac{27}{64}M_C$):

$$F \approx \frac{27GmM_C}{64\left(\frac{3}{4}R_C\right)^2} = \frac{27G\rho_{cp}\frac{R_C}{2}SM_C}{64\left(\frac{3}{4}\right)^2R_C^2} = \frac{3G\rho_{cp}SM_C}{8R_C}.$$

Давление на искомой глубине $p = \frac{F}{S} = \frac{3}{8}\frac{G\rho_{cp}M_C}{R_C} = \frac{3GM_C^2}{8R_C\frac{4}{3}\pi R_C^3} = \frac{9GM_C^2}{32\pi R_C^4}$, а температура $T = \frac{p}{nk} = \frac{G\rho_{cp}M_CM}{\frac{9}{8}R_C\rho_{cp}N_Ak} = \frac{8GM_CM}{9R_CN_Ak}$.

Подставив числовые значения, получим оценку давления и температуры: $p = 10^{14}$ Па; $T = 10^7$ К.

Итак, в недрах Солнца давление газа примерно в миллиард раз превышает нормальное атмосферное давление, а температура составляет около 10 миллионов кельвинов. Эти результаты близки к полученным более строго.

РЕШИТЕ

22.1. Чему равно отношение средних квадратичных скоростей молекул водорода и кислорода при одинаковых температурах газов?

22.2. Для осуществления физического эксперимента необходимо разогреть в замкнутом сосуде водород до температуры $2 \cdot 10^8$ К. Чему равна максимально допустимая концентрация атомов водорода в сосуде, если стенки сосуда могут выдержать давление 10^6 Па?

22.3. Температура атмосферы Солнца — фотосферы — равна 6000 К, концентрация атомов составляет примерно 10^{15} частиц на 1 см^3. Предполагая, что фотосфера состоит в основном из атомарного водорода, определите давление и плотность солнечной атмосферы.

Возьмите все термометры, которые у вас имеются в доме, и сравните их. Чем отличается процесс измерения температуры тела человека от процесса измерения температуры воздуха или жидкости?

1. Термометры, которые используются у вас дома.
2. Принципы, которыми руководствуются при изготовлении термометров и их градуировке. Современные термометры.
3. Особенности использования термометров для измерения сверхнизких и сверхвысоких температур.

§ 23. Уравнение состояния идеального газа

Повторите: концентрация, число Авогадро.

Используя зависимость давления идеального газа от его температуры и концентрации молекул (см. формулу (22.8)), можно найти связь между основными макроскопическими параметрами газа — его массой m, объёмом V, давлением p и температурой T.

Концентрация n молекул газа равна:

$$n = \frac{N}{V}, \tag{23.1}$$

где N — число молекул газа в сосуде объёмом V.

Число N можно представить как произведение количества вещества ν, выраженного в молях, на постоянную Авогадро N_A:

$$N = \nu N_A. \tag{23.2}$$

Из выражений (22.8), (23.1) и (23.2) получим

$$pV = \nu N_A kT. \tag{23.3}$$

ЗАПОМНИТЕ Произведение постоянной Авогадро N_A на постоянную Больцмана k называется **молярной газовой постоянной** R.

Молярная газовая постоянная равна:

$$R = N_A k \approx 6 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}} \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} = 8{,}31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

Используя молярную газовую постоянную R, выражение (23.3) преобразуем к виду

$$pV = \nu RT. \tag{23.4}$$

Количество вещества ν можно найти, если известна масса вещества m и его молярная масса M:

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

С учётом этого выражение (23.4) можно записать в такой форме:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \tag{23.5}$$

ЗАПОМНИТЕ Полученное выражение (23.5) называется **уравнением состояния идеального газа**.

Оно может быть записано и так:

$$p = \frac{1}{M} \rho RT, \tag{23.6}$$

где ρ — плотность газа.

Опытная проверка уравнения состояния идеального газа. Уравнение (23.5) мы получили, применив основные представления молекулярно-кинетической

теории к идеальному газу. Для того чтобы проверить, можно ли использовать это уравнение на практике для описания физических процессов в газах, можно выполнить эксперимент с атмосферным воздухом, заключённым в гофрированном сосуде — сильфоне (рис. 2.8).



Рис. 2.8

Верхняя крышка сильфона соединена со стержнем, имеющим винтовую резьбу. Вращением этого стержня можно поднимать или опускать крышку сильфона, растягивая или сжимая сильфон и изменяя тем самым его объём. Шкала на боковой планке позволяет измерить объём сильфона в условных единицах. Для измерения давления воздуха сильфон подключают к манометру. Температуру воздуха можно изменять, нагревая или охлаждая сильфон.

Из уравнения состояния идеального газа (23.5) следует, что при постоянных значениях массы m газа и молярной массы M отношение произведения давления p газа на объём V к абсолютной температуре T должно иметь постоянное значение при любых изменениях этих параметров:

$$\frac{pV}{T} = \frac{mR}{M} = \text{const}. \qquad (23.7)$$

Проверим, выполняется ли равенство (23.7) для воздуха.

При обоих открытых кранах манометра установим с помощью вращения рукоятки винта объём сильфона $V_1 = 0{,}8V_{max}$, где V_{max} — максимальный объём сильфона. Закроем кран на свободном конце трубки манометра. Давление воздуха в сильфоне равно нормальному атмосферному давлению ($p_1 = 10^5$ Па). Определим по термометру температуру, выразим её в кельвинах.

Измеренные значения объёма, давления, абсолютной температуры воздуха занесём в таблицу. Вычислим отношение $\frac{p_1V_1}{T_1}$.

Поместим сильфон в сосуд с горячей водой и уменьшим объём воздуха в сильфоне до $V_2 = 0{,}6V_{max}$. Измерив давление p_2 и температуру T_2, вычислим отношение $\frac{p_2V_2}{T_2}$.

Поместим сильфон в сосуд с холодной водой и увеличим объём воздуха в сильфоне до $V_3 = V_{max}$. Измерим давление p_3 и температуру T_3. Вычислим отношение $\frac{p_3V_3}{T_3}$. Сравнив все три отношения, мы увидим, что для воздуха в сильфоне в пределах границ ошибки измерений выполняется равенство

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2} = \frac{p_3V_3}{T_3}.$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Следовательно, уравнение состояния идеального газа в пределах погрешности эксперимента применимо для описания свойств реального газа — воздуха.

Опыты более точные, чем проведённые нами, показывают, что при температурах, далёких от абсолютного нуля, и малых значениях плотности уравнения (23.5) и (23.6) могут быть использованы для описания свойств любых реальных газов.



Д. И. Менделеев

ИНТЕРЕСНО Уравнение, устанавливающее связь между давлением, объёмом и температурой газа, было впервые получено французским физиком Б. Клапейроном (1799—1864). В форме (23.5) для случая $\nu = 1$ моль его вывел русский химик Д. И. Менделеев (1834—1907).

ЗАПОМНИТЕ Уравнение состояния газа

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

называется **уравнением Менделеева—Клапейрона.**

Постоянная Больцмана. Состояние идеального газа. Уравнение Менделеева—Клапейрона

1. Каким образом можно проверить применимость уравнения состояния идеального газа для описания свойств реальных газов? 2. При каких условиях свойства реальных газов близки к свойствам идеального газа? 3. При каких условиях свойства реальных газов существенно отличаются от свойств идеального газа?

ЗАДАЧА. При температуре 27 °С и давлении 10^5 Па объём воздушного шара, заполненного гелием, равен 500 м^3. Каким будет объём этого шара при подъёме в верхние слои атмосферы, где его температура понизится до −33 °С, а давление окружающего воздуха станет равным $5 \cdot 10^4$ Па? Массу гелия считайте постоянной.

Решение. Из уравнения состояния идеального газа $pV = \frac{m}{M}RT$ следует, что при $m = \text{const}$ выполняется равенство $\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}$. Отсюда $V_2 = \frac{p_1V_1T_2}{T_1p_2}$;

$V_2 = \frac{10^5 \cdot 500 \cdot 240}{300 \cdot 5 \cdot 10^4}$ (м^3) = 800 м^3.

РЕШИТЕ 23.1. Используя уравнение состояния идеального газа, вычислите по четырём параметрам, представленным в таблице 2, пятый, неизвестный параметр.

Таблица 2

m, кг	M, кг/моль	p, Па	V, м^3	T, К
8	$4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^5$	16,6	x_1
$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$8{,}3 \cdot 10^3$	x_2	200
64	$32 \cdot 10^{-3}$	x_3	24,9	300
7	x_4	10^5	8,3	400
x_5	$44 \cdot 10^{-3}$	10^7	$2{,}49 \cdot 10^{-2}$	300

23.2. Под каким давлением находится углекислый газ в огнетушителе объёмом 2 дм^3, если масса огнетушителя до заполнения газом была 4,2 кг, а после заполнения — 5,6 кг? Температуру газа считайте равной 37 °С.

23.3. Физический кабинет имеет размеры 6 × 12 × 3 м. Определите массу воздуха в кабинете при температуре 27 °С и нормальном атмосферном давлении.

23.4. При температуре 17 °С в баллоне вместимостью 30 дм^3 находится 5,4 кг газа под давлением 10 МПа. Какой газ в баллоне?

23.5. Объём камеры насоса равен V_0. За сколько циклов работы насоса можно накачать автомобильную камеру объёмом V от давления p_1 до давления p_2? Температуру газа считайте постоянной.

23.6. В конце процесса сжатия газа в цилиндре карбюраторного двигателя внутреннего сгорания давление было $9 \cdot 10^5$ Па, в конце процесса сгорания топлива стало $3{,}5 \cdot 10^6$ Па. Определите температуру газа в цилиндре в конце процесса сгорания топлива. Температура в конце процесса сжатия 400 °С. Можно считать, что поршень во время сгорания топлива был неподвижным.

23.7. Воздушный шар объёмом 10^3 м^3 заполнен гелием. При нормальных условиях он может поднять полезный груз массой 10^3 кг. Какой груз может поднять тот же воздушный шар при замене гелия водородом при той же температуре?

23.8. В цилиндре дизельного двигателя объём воздуха при сжатии поршнем уменьшается в 20 раз, давление увеличивается от 10^5 до $6 \cdot 10^6$ Па. Чему равна температура воздуха в конце процесса сжатия, если в начале процесса сжатия она равна 27 °С?

23.9*. Два сосуда объёмами V_1 и V_2 заполнены идеальным газом при давлениях p_1 и p_2. Какое установится давление в сосудах, если их соединить между собой? Температура газа постоянна.

23.10. В трубке имеется столбик ртути длиной 10 см, отделяющий некоторый объём воздуха внутри трубки. При вертикальном положении трубки открытым концом вниз длина столбика воздуха над столбиком ртути равна 30 см, при горизонтальном же положении трубки длина столбика воздуха 26 см. Определите по этим данным атмосферное давление воздуха.

23.11. В вертикально расположенной стеклянной трубке, площадь поперечного сечения которой S, находится водород, количество вещества которого равно ν, а над ним — столбик ртути. При нагревании водорода на ΔT столбик ртути поднялся на высоту h. Определите массу ртути в трубке, если атмосферное давление в опыте было постоянно и равно p_0.

23.12. Докажите, что объём любого идеального газа, взятого в количестве 1 моль, при нормальных условиях равен $2{,}24 \cdot 10^{-2}$ м^3.

1. Проведите опыт. Надуйте воздушный шарик. Измерьте примерно его объём. Положите шарик в холодильник. Через некоторое время определите его объём. Произошли ли какие-либо изменения?

2. Проведите опыт. Возьмите металлическую кружку или небольшую кастрюлю и накройте её тонкой резиной от разрезанного воздушного шарика. Чтобы воздух не проходил через место соединения, туго привяжите резину ниткой или скотчем. Поместите кружку или кастрюлю в холодильник и посмотрите, что будет происходить с резиной. Затем всё поместите в другую кастрюлю (или миску) с тёплой водой. Сделайте выводы.

Принцип действия сильфона.

§ 24. Изопроцессы в газах

Повторите: идеальный газ.

Многие процессы в газах, происходящие в природе и осуществляемые в технике, происходят так, что изменяются лишь два параметра из пяти. Рассмотрим три таких процесса — изотермический, изохорный и изобарный.

Изотермический процесс.

ЗАПОМНИТЕ **Изотермическим процессом** называется процесс, протекающий при постоянной температуре.

Из уравнения состояния идеального газа (23.5) следует, что при постоянной температуре и неизменных значениях массы газа и его молярной массы произведение давления газа на его объём должно оставаться постоянным:

$$pV = \text{const}. \qquad (24.1)$$

Обозначив постоянную через b, уравнение (24.1) представим в виде

$$p = \frac{b}{V}. \qquad (24.2)$$

Изотермический процесс можно осуществить, например, путём изменения объёма сильфона при постоянной температуре.

ЗАПОМНИТЕ График уравнения изотермического процесса называется **изотермой**.

Изотерма, изображённая в прямоугольной системе координат, по оси ординат которой отсчитывается давление газа, а по оси абсцисс — его объём, является гиперболой (рис. 2.9).

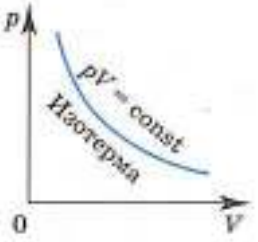


Рис. 2.9

ИНТЕРЕСНО Уравнение (24.1), устанавливающее связь между давлением и объёмом газа при постоянной температуре, было получено из эксперимента до создания молекулярно-кинетической теории газов английским физиком Р. Бойлем в 1662 г. и французским физиком Э. Мариоттом в 1676 г. Поэтому его называют *законом Бойля—Мариотта* (см. § 21).

Изохорный процесс.

ЗАПОМНИТЕ **Изохорным процессом** называется процесс, протекающий при неизменном объёме.

Уравнение изохорного процесса при $m = \text{const}$ и $M = \text{const}$ имеет вид

$$\frac{p}{T} = \text{const}, \qquad (24.3)$$

или

$$p = p_0 \alpha T, \qquad (24.4)$$

где p_0 — давление газа при температуре 0 °С; α — температурный коэффициент давления, равный (1/273,15) $К^{-1}$.

ЗАПОМНИТЕ График уравнения изохорного процесса называется **изохорой.**

Изохора, изображённая в прямоугольной системе координат, по оси ординат которой отсчитывается давление газа, а по оси абсцисс — его абсолютная температура, является прямой, продолжение которой проходит через начало координат (рис. 2.10).

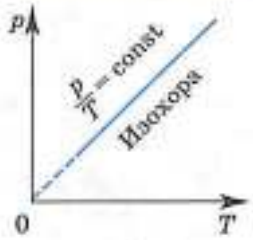


Рис. 2.10

ИНТЕРЕСНО Экспериментальным путём зависимость давления газа от температуры исследовал в 1787 г. французский физик Ж. Шарль. Поэтому уравнение (24.3) называют *законом Шарля* (см. § 21).

Изохорный процесс можно осуществить, например, нагреванием воздуха в сильфоне при постоянном объёме.

Изобарный процесс.

ЗАПОМНИТЕ **Изобарным процессом** называется процесс, протекающий при неизменном давлении.

Уравнение изобарного процесса при m = const и M = const имеет вид

$$\frac{V}{T} = \text{const}, \qquad (24.5)$$

или

$$V = V_0 \alpha T, \qquad (24.6)$$

где V_0 — объём, занимаемый газом при температуре 0 °С; коэффициент α равен (1/273,15) $К^{-1}$.

ЗАПОМНИТЕ График уравнения изобарного процесса называется **изобарой.**

Изобара, изображённая в прямоугольной системе координат, где на оси ординат отсчитывается объём газа, а на оси абсцисс — его абсолютная температура, является прямой, продолжение которой проходит через начало координат (рис. 2.11).

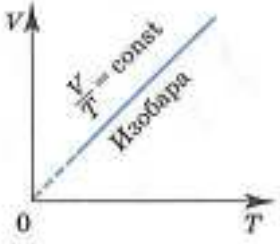


Рис. 2.11

ИНТЕРЕСНО Экспериментальное исследование зависимости объёма газа от температуры провёл в 1802 г. французский физик Ж. Гей-Люссак. Поэтому уравнение (24.5) называют *законом Гей-Люссака* (см. § 21).

Изобарный процесс можно наблюдать при нагревании или при охлаждении воздуха в стеклянной колбе,

соединённой со стеклянной трубкой, отверстие в которой закрыто небольшим столбом жидкости.

Изопроцессы. Изотерма. Изобара. Изохора

1. Приведите примеры изотермических процессов в природе и технике. 2. Приведите примеры изобарных процессов в природе и технике. 3. Приведите примеры изохорных процессов в природе и технике. 4. Покажите, что уравнение (24.4) является следствием уравнения состояния идеального газа для изохорного процесса. 5. Покажите, что уравнение (24.6) является следствием уравнения состояния идеального газа для изобарного процесса.

ЗАДАЧА 1. Постройте график изотермического процесса идеального газа при температуре 300 К. Начальное давление и объём соответственно равны 9 кПа и 2 м^3, конечное давление равно 2 кПа.

Решение. Для построения графика изотермического процесса в координатных осях $p—V$ будем откладывать по оси абсцисс значения объёма газа, по оси ординат — значения давления. Масштаб выберем таким, чтобы начальные и конечные значения давления и объёма укладывались на графике. Точку графика, соответствующую начальному состоянию газа, найдём на пересечении двух прямых: параллельной оси ординат (она пересекает ось абсцисс в точке $V_1 = 2$ м^3) и параллельной оси абсцисс (она пересекает ось ординат в точке $p_1 = 9$ кПа).

Для нахождения остальных точек графика необходимо воспользоваться уравнением изотермического процесса и найти значения объёма V_2, V_3, ..., V_n, соответствующие выбранным значениям давления p_2, p_3, ..., p_n. Получим

p, кПа	9	8	7	6	5	4	3	2
V, м^3	2	2,35	2,57	3	3,6	4,5	6	9

По найденным значениям объёма газа при выбранных значениях давления нанесём точки, через которые проведём кривую, которая и будет графиком изотермического процесса в координатных осях $p—V$ (рис. 2.12).

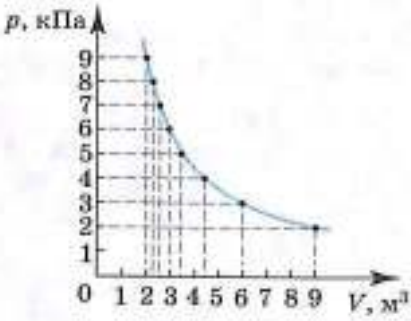


Рис. 2.12

Построение графиков изотермического процесса в координатных осях $V—T$ и $p—T$ является более простой задачей.

При выборе оси абсцисс для отсчёта значений температуры газа следует учитывать, что графики изотермических процессов представляют собой прямые, параллельные оси ординат. Продолжение каждой из этих прямых до оси абсцисс пересекает её в точке, соответствующей значению температуры изотермического процесса. Ординаты верхней и

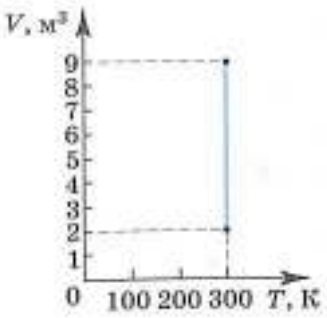


Рис. 2.13

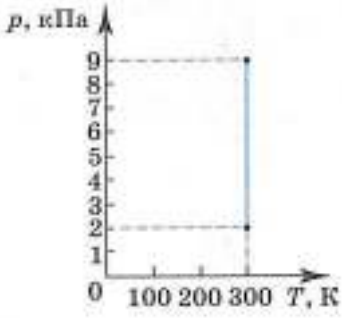


Рис. 2.14

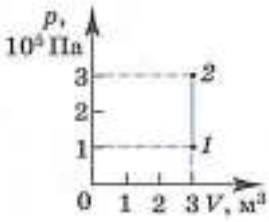


Рис. 2.15

нижней точек этих графиков определяются начальными и конечными значениями объёма газа (рис. 2.13) и его давления (рис. 2.14).

ЗАДАЧА 2. По графику процесса, осуществлённого с идеальным газом (рис. 2.15), постройте графики этого процесса в координатных осях $p—T$ и $V—T$. Температура газа в начальном состоянии была равна 250 К.

Решение. График показывает, что давление газа при переходе из состояния *1* в состояние *2* увеличилось в три раза, а объём в течение всего процесса оставался неизменным. Следовательно, процесс изменения состояния газа был изохорным. При изохорном процессе связь между давлением p газа и абсолютной температурой T выражается уравнением

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

Отсюда $T_2 = \dfrac{p_2 T_1}{p_1} = \dfrac{3 \cdot 10^5 \cdot 250}{10^5}$ (К) = 750 К.

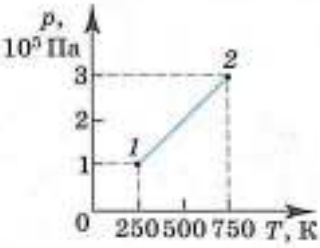


Рис. 2.16

По известным начальным и конечным значениям давления и температуры построим в системе координат с осями p, T точки *1* и *2*, соответствующие начальному и конечному состояниям газа. Зависимость давления p от температуры T линейная, следовательно, график изохорного процесса в координатных осях $p—T$ является прямой, проходящей через точки *1* и *2* (рис. 2.16).

В координатных осях $V—T$ график изохорного процесса — это отрезок прямой, параллельной оси абсцисс (рис. 2.17).

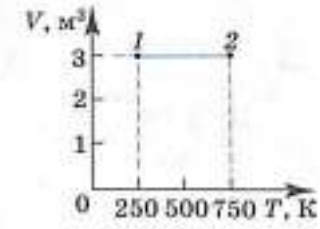


Рис. 2.17

РЕШИТЕ 24.1. Постройте график изотермического процесса при температуре 300 К в координатных осях $p—V$, $V—T$ и $p—T$. Начальные значения давления и объёма газа соответственно равны $p_1 = 10^5$ Па, $V_1 = 16$ м³, конечное давление равно $p_2 = 1{,}6 \cdot 10^6$ Па.

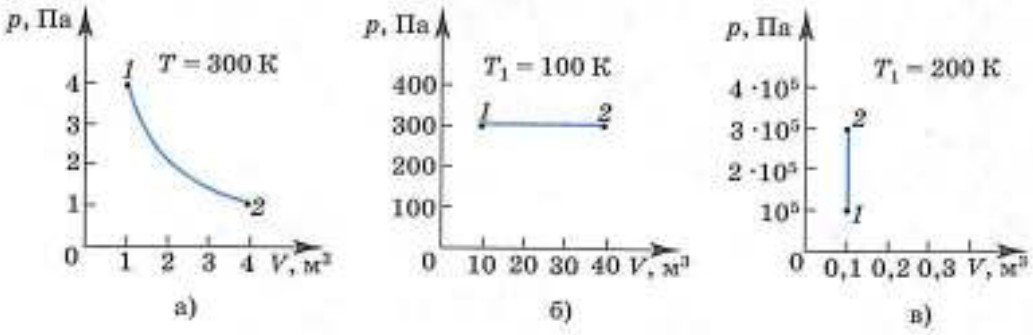


Рис. 2.18

24.2. По графикам изопроцессов в координатных осях p—V (рис. 2.18, *а*—*в*) постройте графики тех же изопроцессов в координатных осях p—T и V—T.

24.3*. По графикам изопроцессов в координатных осях V—T (рис. 2.19) постройте графики тех же изопроцессов в координатных осях p—V и p—T.

24.4*. На рисунке 2.20 представлен график зависимости давления газа от температуры. В каком состоянии (*1* или *2*) газ занимает больший объём? Ответ обоснуйте.

24.5*. На рисунке 2.21 представлены два графика изменения состояния одного и того же идеального газа. Какой график соответствует большему количеству вещества? Объём газа одинаков. Ответ обоснуйте.

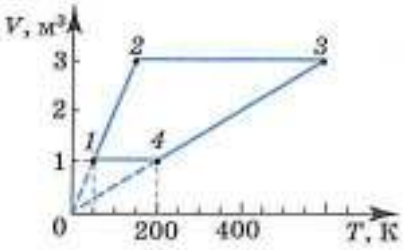


Рис. 2.19

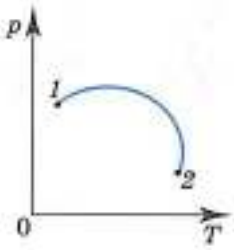


Рис. 2.20

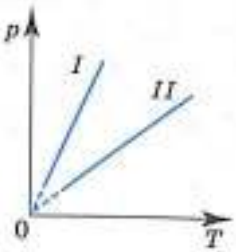


Рис. 2.21

Примеры изопроцессов в природе и технике.

§25. Реальные газы

Повторите: три агрегатных состояния вещества.

Экспериментальные исследования свойств газов при высоких давлениях и низких температурах, выполненные ещё в конце прошлого века, убедительно показали, что уравнение состояния идеального газа даёт хорошее согласие с экспериментом для каждого исследуемого газа лишь при температуре выше некоторого значения, вполне определённого для каждого вещества, и при не очень высоких давлениях.

Расхождение результатов теории и практики в области низких температур и высоких давлений газов свидетельствует о непригодности при этих условиях упрощённой модели строения газов, в которой не учитываются размеры молекул и силы взаимного притяжения.

Уравнение Ван-дер-Ваальса.

ИНТЕРЕСНО В 1873 г. голландский физик И. Ван-дер-Ваальс показал, что согласие результатов теории и эксперимента при установлении зависимости давления газов от объёма и температуры оказывается значительно лучшим, если учесть, что молекулы не только отталкиваются при соударениях, но и притягиваются друг к другу сравнительно слабыми силами на расстояниях, сравнимых с размерами молекул.

С учётом сил взаимного притяжения молекул для газа, взятого в количестве одного моля, было получено уравнение

$$p + \frac{a}{V^2} = \frac{RT}{V}.$$

Это первая поправка, вводимая в уравнение Ван-дер-Ваальса.

Вторая поправка должна учесть то, что при любых, даже сколь угодно больших давлениях объём газа не может быть равным нулю. В модели Ван-дер-Ваальса молекулы принимают за твёрдые шарики диаметром d. В этом случае оказывается, что молекулы реального газа свободно перемещаются не в объёме V сосуда, а в уменьшенном объёме:

$$V = V - b,$$

где b — так называемый запрещённый объём.

Тогда получим

$$p + \frac{a}{V^2} = \frac{RT}{V - b}, \text{ или } \left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT.$$

Это и есть *уравнение Ван-дер-Ваальса* для реального газа в количестве одного моля.

Хотя уравнение Ван-дер-Ваальса даёт лучшее согласие теории с результатами эксперимента, всё же точность расчётов, выполненных на его основе, обычно недостаточна для решения практических задач на уровне требований



Рис. 2.22

современной техники. Поэтому на практике приходится использовать уравнения состояния реального газа ещё более сложного вида. Уравнение же Ван-дер-Ваальса интересно тем, что даёт качественное объяснение основных отличий в поведении реального газа от идеального.

Средняя длина свободного пробега. В некоторых задачах появляется необходимость учёта конечных размеров молекул. Молекулы газа испытывают столкновения не только со стенками сосуда, но и друг с другом. Поэтому одним из параметров газа является средняя длина свободного пробега его молекул.

ЗАПОМНИТЕ **Длиной свободного пробега** молекулы газа называют длину пути, пройденного ею между двумя последовательными столкновениями (рис. 2.22).

Так как молекулы газа распределены в пространстве беспорядочно, движутся во всевозможных направлениях и с различными скоростями, то длина пути между каждыми двумя последовательными столкновениями молекулы оказывается величиной непостоянной. Однако

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ можно найти **среднее значение длины свободного пробега** молекулы газа для большого числа столкновений и пользоваться этим параметром для характеристики газа.

Среднюю длину свободного пробега можно вычислить теоретически, если известны радиус молекул и их концентрация. При расчётах будем считать, что молекулы газа при столкновении ведут себя как упругие шары, отталкивающиеся только при соприкосновении, если расстояние между их центрами равно удвоенному радиусу: $d = 2r$. Силы взаимного притяжения молекул во внимание принимать не будем.

Для определения средней длины свободного пробега вычислим сначала число столкновений, которое испытывает молекула за 1 с. Если средняя скорость движения молекулы равна $\bar{v}$, то для определения числа соударений Z, испытываемых ею за 1 с, необходимо найти число молекул, центры которых попадают внутрь цилиндра радиусом $d = 2r$ и длиной $l = \bar{v}\Delta t$ ($\Delta t = 1$ с). Очевидно, что число соударений можно определить как произведение объёма цилиндра на концентрацию молекул газа:

$$Z = V_{\text{ц}} n = Sln = \pi(2r)^2 n \bar{v} \Delta t = 4\pi r^2 n \bar{v} \Delta t.$$

Разделив путь l, пройденный молекулой за 1 с, на число столкновений Z, испытанных ею за это же время, получим среднюю длину свободного пробега λ:

$$\lambda = \frac{l}{Z} = \frac{\bar{v}\Delta t}{4\pi r^2 n \bar{v} \Delta t} = \frac{1}{4\pi r^2 n} = \frac{1}{\sigma n},$$

где $\sigma = 4\pi r^2$ — эффективное сечение.

Диффузия в газах. Если молекула газа при каждом столкновении изменяет направление движения совершенно случайным образом, то среднее расстояние s, на которое молекула удалится от первоначального своего местонахождения за время t, можно определить, если известны средняя длина её свободного пробега λ и средняя частота столкновений Z.

Кажется правдоподобным предположение, что результатом хаотичного блуждания каждой молекулы должно быть «топтание» её вблизи одного и того же места, сколько бы времени ни прошло.

Однако простые наблюдения за процессом диффузии заставляют отказаться от этого предположения. В комнате, где только что выкрашены полы и стены, запах краски ощущается в любой точке пространства комнаты и даже за её пределами, а не только вблизи окрашенных поверхностей. Значит, молекулы растворителя, испарившись с окрашенной поверхности, не «толкутся» вблизи места своего освобождения, а удаляются от него на большие расстояния.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Как показывает анализ хаотичного движения молекул, модуль перемещения s молекулы за время t пропорционален корню квадратному из числа столкновений N, испытанных ею за это же время, и средней длине свободного пробега λ:

$$s = \sqrt{N}\lambda = \sqrt{\frac{\bar{v}t}{\lambda}}\lambda = \sqrt{\bar{v}\lambda t}. \qquad (25.1)$$

Полученное соотношение позволяет определять среднюю длину свободного пробега λ газовых молекул за известное время t по экспериментальному значению модуля перемещения s и вычисленной средней скорости $\bar{v}$ их движения.

Интересно сравнить модуль перемещения молекулы газа за счёт диффузии с расстоянием, которое могла бы пройти молекула за 1 с, если бы не было соударений с другими молекулами.

ИНТЕРЕСНО Выполним расчёт для воздуха при нормальном атмосферном давлении и температуре 20 °С. Средняя скорость теплового движения молекул при этих условиях примерно 500 $\frac{\text{м}}{\text{с}}$, средняя длина свободного пробега их около $6 \cdot 10^{-8}$ м, тогда среднее значение модуля перемещения s молекулы за 1 с равно:

$$s \approx \sqrt{500\,\frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1\,\text{с} \cdot 6 \cdot 10^{-8}\,\text{м}} = 5{,}5 \cdot 10^{-3}\,\text{м} = 5{,}5\,\text{мм}.$$

При нормальных условиях молекула могла бы пробежать за 1 с путь около 0,5 км, но из-за хаотичных изменений направления движения в результате большого числа столкновений с другими молекулами она смещается от своего первоначального положения в среднем всего на 5 мм!

Следует обратить внимание на то, что процесс диффузии газовых молекул нельзя охарактеризовать понятием средней скорости диффузии, как это хотелось бы сделать.

Объясняется это тем, что модуль среднего перемещения молекулы пропорционален времени не в первой степени, а в степени $\frac{1}{2}$. Следовательно, если определить скорость диффузии как $\frac{s}{t}$, то эта величина окажется непостоянной и будет убывать с увеличением промежутка времени.

Реальный газ. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Длина свободного пробега

1. Каков смысл первой и второй поправок в уравнении Ван-дер-Ваальса? 2. Является ли изотерма вандерваальсова газа гиперболой? 3. От чего зависит средняя длина свободного пробега молекул газа? 4. Как зависит модуль перемещения молекулы при хаотичном тепловом движении от времени? 5. Сравните выражения для модуля перемещения броуновской частицы (20.1) и для модуля перемещения молекулы при диффузии (25.1). Какие выводы можно сделать?

РЕШИТЕ

25.1. Как изменится частота столкновений молекулы газа с другими молекулами при увеличении давления газа в два раза? Температура постоянна.

25.2. В межзвёздном пространстве содержится газообразный атомарный водород. Его концентрация примерно 1 атом в 1 см^3, температура 125 К. Вычислите давление межзвёздного газа, длину свободного пробега и средний промежуток времени между двумя столкновениями молекул. Радиус атома водорода равен $5 \cdot 10^{-11}$ м.

25.3. Оцените, каким должно быть давление азота в сосуде, чтобы при температуре 0 °С длина свободного пробега его молекул была равна 1 м. Эффективное сечение молекулы азота примите равным $4{,}3 \cdot 10^{-19}$ м^2.

Надуйте воздушный шар, а затем, не завязывая отверстие ниткой, отпустите. Объясните особенности движения шара.

1. Отличия реальных газов от идеального.
2. Роль поправок в уравнении Ван-дер-Ваальса.

§ 26. Агрегатные состояния и фазовые переходы

Повторите: агрегатное состояние.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Все вещества (за малым исключением) могут находиться в трёх агрегатных состояниях — газообразном, жидком и твёрдом (кристаллическом). Переход вещества из одного состояния в другое зависит от условий, в которых оно находится, — от давления и температуры.

В газах и жидкостях структурные элементы, из которых состоит то или иное вещество, — атомы, молекулы или ионы — расположены беспорядочно. Иначе обстоит дело с кристаллами, в них частицы вещества расположены упорядоченно, образуя кристаллическую решётку. Таких решёток у вещества может быть несколько, в результате чего возможно несколько различных модификаций кристалла с разными свойствами. Например, углерод образует две кристаллические модификации — графит и алмаз.

Исходя из этого, кроме понятия агрегатного состояния, вводится более широкое понятие фазы.

ЗАПОМНИТЕ **Фаза** — это равновесное состояние вещества, отличающееся по своим физическим свойствам от других состояний того же вещества.

У вещества возможны газообразная и жидкая фазы и одна или несколько кристаллических фаз.

ЗАПОМНИТЕ Переход вещества из одной фазы в другую называется **фазовым переходом.**

При таких переходах меняются механические, тепловые, электрические и магнитные свойства вещества.

Пары и «постоянные газы».

ИНТЕРЕСНО Примерно до середины XIX в. вещества в газообразном состоянии разделялись на пары и «постоянные газы». «Постоянными газами» называли аммиак, кислород, азот, водород, хлор, так как их не удавалось перевести в жидкое состояние путём повышения давления.

Об отсутствии принципиального различия между парами и «постоянными газами» догадался ещё в конце XVII в. А. Лавуазье. Он считал, что при достаточно низкой температуре в жидкость превращается и атмосферный воздух. Первым из «постоянных газов» был сжижен аммиак при повышении давления до $7 \cdot 10^5$ Па. В 1823 г. М. Фарадею удалось превратить в жидкость хлор путём охлаждения его при повышенном давлении. В 1877 г. французский инженер Л. Кальете и швейцарский физик Р. Пикте независимо друг от друга добились сжижения кислорода при повышении давления примерно до $3 \cdot 10^7$ Па и охлаждении до температуры ниже −140 °С. В том же году был сжижен азот. В 1898 г. английский физик Дж. Дьюар получил жидкий водород, а в 1908 г. в Голландии Г. Камерлинг-Оннес перевёл в жидкое состояние гелий.

Было установлено, что из газообразного состояния в жидкое можно перевести любое вещество. Однако каждое вещество может испытать такое превращение лишь при температурах ниже определённого значения.

ЗАПОМНИТЕ Температура, ниже которой вещество может переходить из газообразного состояния в жидкое, называется **критической температурой** $T_к$.

При температуре выше критической вещество не превращается в жидкость или твёрдое тело ни при каких давлениях. Очевидно, что при критической температуре средняя кинетическая энергия теплового движения молекул вещества примерно равна модулю потенциальной энергии их связи в жидкости или твёрдом теле.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Так как силы притяжения, действующие между молекулами разных веществ, различны, неодинакова и потенциальная энергия их связи, отсюда различными оказываются критические температуры для разных веществ.

Сжижение газов. Рассмотрим основные принципы, используемые в машинах для сжижения газов.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Первое условие, которое необходимо выполнить для превращения газа в жидкость, — это охлаждение его до температуры ниже критической.

При температуре ниже критической любой газ может быть переведён в жидкое состояние путём повышения давления, поэтому сжижение газов, имеющих высокую критическую температуру, не представляет принципиальной трудности. Более сложной задачей является сжижение газов, критическая температура которых близка к абсолютному нулю. Такими газами являются кислород, азот, водород, гелий, критические температуры которых равны соответственно 154,58, 126,25, 33,24 и 5,2 К. Такие низкие температуры не встречаются на Земле в естественных условиях, поэтому проблема сжижения этих газов оказывается тесно связанной с проблемой получения низких температур.

Приведём и наиболее характерные для перечисленных выше газов температуры конденсации (кипения) при нормальном атмосферном давлении, равном 760 мм рт. ст.: 90,2 К для кислорода; 77,4 К для азота; 20,3 К для водорода; 4,2 К для гелия.

Особенности жидкого состояния вещества.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Способность любого вещества превращаться из газа в жидкость доказывает, что между частицами вещества (атомами, молекулами) действуют силы не только отталкивания, но и притяжения.

Частицы вещества в жидкости или твёрдом теле плотно упакованы, т. е. находятся друг от друга в среднем на таких расстояниях, при которых сила взаимодействия между ними равна нулю, т. е. энергия взаимодействия минимальна. Смещаясь периодически от положений равновесия, частицы совершают тепловые колебания.

ЗАПОМНИТЕ Упорядоченное расположение молекул в жидкостях, которое сохраняется лишь среди ближайших соседей, т. е. на расстояниях порядка нескольких молекулярных диаметров, называется **ближним порядком**.

Молекулы жидкости, совершая тепловые колебания около положений равновесия, при столкновениях друг с другом могут приобрести энергию, достаточную для того, чтобы «перекочевать» в новое положение равновесия. В результате этого ближний порядок постоянно разрушается тепловым движением и вновь создаётся силами межмолекулярного взаимодействия.

Существование ближнего порядка в расположении молекул жидкости и возможность их сравнительно свободного перемещения друг относительно друга обусловливают ряд свойств жидкостей. Так, объём жидкости мало зависит от давления.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Малая сжимаемость является свойством, общим для жидких и твёрдых тел и отличающим их от газов, способных занимать любой предоставленный им объём.

Возможность свободного перемещения молекул относительно друг друга обусловливает свойство текучести жидкости. Вследствие этого форма жидкого тела определяется формой сосуда, в котором находится жидкость, действием внешних сил (в частности, силы тяжести) и сил поверхностного натяжения. Большая свобода движения молекул в жидкости приводит к большей скорости диффузии в жидкостях, чем в твёрдых телах, обеспечивает возможность растворения твёрдых веществ в жидкостях.

Твёрдое тело. Из газообразного и жидкого состояний любое вещество может перейти в твёрдое состояние.

ЗАПОМНИТЕ Твёрдое тело отличается от жидкости тем, что при тепловых колебаниях около положений равновесия атомы и молекулы длительное время не могут изменить своего положения среди других атомов.
В твёрдых телах устанавливается **дальний порядок** в расположении атомов — строгая периодичность в расположении атомов на протяжении тысяч межатомных расстояний.

Упорядоченная структура в реальном кристалле нарушается из-за наличия дефектов. Дефекты в структуре кристаллической решётки облегчают также переходы атомов или молекул в кристалле с одного места на другое, но происходят такие переходы редко. Среднее время «оседлой жизни» молекул исчисляется сутками и годами. Поэтому диффузия в кристаллах протекает медленно.

Диаграмма состояний вещества. На рисунке 2.23 изображены диаграммы трёх фазовых состояний вещества. Равновесному состоянию между жидкостью и её паром соответствует кривая испарения AK.

Равновесие между твёрдым и жидким состояниями вещества характеризует кривая плавления AB.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ При давлениях и температурах, соответствующих точкам кривой плавления, твёрдое тело и расплав, приведённые в соприкосно-

вание, находятся в динамическом равновесии. Число молекул, переходящих в единицу времени из жидкости в твёрдое тело, равно числу молекул, переходящих границу раздела между ними в противоположном направлении.

Кривая плавления идёт почти вертикально, поскольку температура плавления слабо зависит от давления (на рисунке 2.23, *а* она немного отклонена вправо). Этим иллюстрируется повышение температуры плавления с увеличением давления, наблюдаемое у большинства веществ. Для вещества, обладающего в твёрдом состоянии меньшей плотностью, чем в жидком (лёд, висмут, серый чугун), увеличение давления способствует плавлению. Для таких веществ кривая плавления отклонена влево от вертикали (рис. 2.23, *б*).

Кривая *CA* на диаграмме состояний вещества отвечает значениям давления и температуры, при которых устанавливается равновесие между процессами испарения молекул (атомов) твёрдого тела и конденсации их на поверхности твёрдого тела.

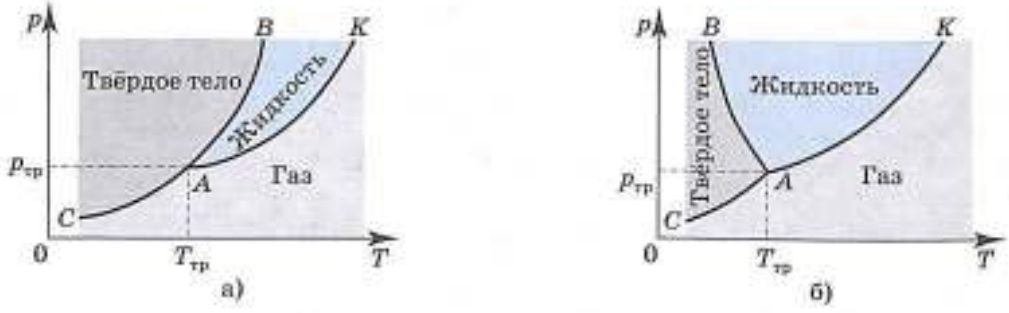


Рис. 2.23

ЗАПОМНИТЕ Процесс испарения твёрдых тел называется **сублимацией**.

Конечно, сублимации сопутствует и обратный процесс — кристаллизация из пара. При определённых значениях температуры и давления система кристалл — пар находится в динамическом равновесии. С уменьшением температуры кристалла уменьшается и давление его насыщенного пара (см. кривую сублимации *CA*).

Тройная точка.

ЗАПОМНИТЕ Кривые плавления и парообразования пересекаются в точке (точка *A* на рисунке 2.23), называемой **тройной точкой**.

Если при давлении $p_{тр}$ и температуре $T_{тр}$ некоторые части вещества в твёрдом, жидком и газообразном состояниях находятся в контакте, то без подведения или отвода тепла количество вещества, находящегося в каждом из трёх состояний, не изменяется.

Из диаграммы состояний вещества видно, что переход вещества при нагревании из твёрдого состояния в газообразное может совершаться, минуя жидкое состояние.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Переход кристалл — жидкость — газ при нормальном атмосферном давлении происходит лишь у тех веществ, у которых давление в тройной точке ниже этого давления. Те же вещества, у которых давление в тройной точке превышает атмосферное, в результате нагревания при атмосферном давлении не плавятся, а переходят в газообразное состояние (сублимируют).

Например, при атмосферном давлении твёрдая углекислота при нагревании не плавится, а сублимирует. Это объясняется тем, что тройной точке соединения CO_2 соответствует давление, примерно в пять раз большее нормального атмосферного давления.

Поскольку тройной точке соответствует вполне определённая температура, она может служить опорной (основной) точкой термометрической шкалы. Оказывается, что температура тройной точки воды равна 273,16 К (т. е. 0,01 °С). Это позволило ввести в Международной системе единиц следующее определение единицы термодинамической (абсолютной) температуры (1 К):

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ кельвин равен 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды.

Фаза. Фазовый переход. Критическая температура. Ближний порядок. Дальний порядок. Испарение. Конденсация. Сублимация. Тройная точка

1. Каковы особенности жидкого состояния вещества? 2. Что такое ближний порядок в расположении молекул? 3. Чем объясняется свойство текучести жидкости? 4. Что такое дальний порядок? 5. Почему мала сжимаемость твёрдых тел и жидкостей? 6. Может ли вещество переходить из газообразного состояния в твёрдое, минуя фазу жидкого состояния? 7. Может ли твёрдое тело превратиться в газ без плавления? 8. Что такое тройная точка? 9. Как определяется единица температуры — кельвин — в Международной системе единиц?

1. Проведите нагревание и охлаждение олова, парафина. Опыт проводите вместе с учителем. Воспользуйтесь термопарой и устройством регистрации измерения температуры из любой цифровой лаборатории. Объясните провал на графике зависимости температуры от времени при охлаждении олова, полученном в проведённом вами эксперименте.
2. Поместите в колбу несколько кристаллов йода и немного нагрейте её. Внимательно следите за превращениями йода. Опыт проводите вместе с учителем.

Особенности фазовых переходов переохлаждённых и перегретых жидкостей.

§ 27. Испарение и конденсация

Повторите: пар, насыщенный и ненасыщенный пар, кипение.

Испарение. В жидкости или твёрдом теле при любой температуре существует некоторое количество молекул (атомов), кинетическая энергия которых превышает модуль потенциальной энергии их связи с остальными частицами вещества.

ЗАПОМНИТЕ **Испарение** — это процесс, при котором с поверхности жидкости или твёрдого тела вылетают частицы (молекулы, атомы), кинетическая энергия которых превышает потенциальную энергию их связи с остальными частицами вещества.

При испарении с поверхности жидкости или твёрдого тела вылетают наиболее быстрые частицы, обладающие максимальной кинетической энергией. В результате происходит уменьшение средней кинетической энергии остальных частиц. Поэтому процесс испарения сопровождается охлаждением жидкости или твёрдого тела, если только при этом нет подвода тепла из окружающей среды.

Насыщенный и ненасыщенный пар. Процесс испарения жидкости или твёрдого тела в закрытом сосуде либо помещении при неизменной температуре сопровождается постепенным увеличением концентрации молекул испаряющегося вещества в газообразном состоянии. Через некоторое время после начала процесса испарения концентрация вещества в газообразном состоянии достигает такого значения, при котором число молекул, возвращающихся на поверхность жидкости в единицу времени, становится равным числу молекул, покидающих поверхность жидкости за то же время. Устанавливается динамическое равновесие между процессами испарения и конденсации вещества.

ЗАПОМНИТЕ Вещество в газообразном состоянии, находящееся в динамическом равновесии с жидкостью или твёрдым телом, называется **насыщенным паром**. Пар, давление которого ниже давления насыщенного пара при данной температуре, называется **ненасыщенным** (или перегретым).

При уменьшении объёма, занимаемого насыщенным паром, концентрация его молекул увеличивается и пар становится пересыщенным. Равновесие между процессами испарения и конденсации пара нарушается, скорость конденсации превышает скорость испарения, в результате часть вещества из газообразного состояния превращается в жидкое и пар вновь становится насыщенным. Насыщенный пар может стать пересыщенным не только при повышении концентрации молекул, но и при понижении температуры.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Интенсивность процесса испарения увеличивается с возрастанием температуры жидкости (или испаряющегося твёрдого тела).

Поэтому установление динамического равновесия между процессами испарения и конденсации при повышении температуры происходит при более высоких концентрациях молекул газа.

Давление идеального газа при постоянной концентрации молекул возрастает прямо пропорционально абсолютной температуре. Так как в насыщенном паре при возрастании температуры концентрация молекул увеличивается, а их средняя кинетическая энергия также возрастает, то давление насыщенного пара с повышением температуры возрастает быстрее, чем давление идеального газа с постоянной концентрацией молекул (рис. 2.24).

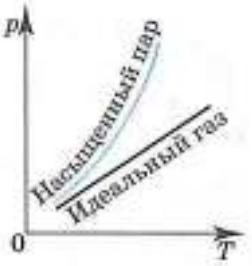


Рис. 2.24

Кипение. Зависимость температуры кипения от давления. Испарение может происходить не только с поверхности жидкости, но и в пузырьки воздуха, который обычно растворён в жидкости. Объём этих пузырьков, заполненных насыщенным паром, невелик, но с ростом температуры резко возрастает. Эти пузырьки всплывают на поверхность жидкости и лопаются, выбрасывая пар в атмосферу, если давление насыщенного пара равно внешнему давлению или превышает его.

ЗАПОМНИТЕ Процесс испарения, идущий по всему объёму жидкости, называется **кипением.**

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Давление насыщенного водяного пара при кипении равно внешнему давлению на жидкость.

При нормальном давлении кипение воды происходит при 100 °С. При температуре, например, 80 °С давление насыщенного пара примерно в два раза меньше нормального атмосферного давления. Поэтому вода при этой температуре должна закипеть, если давление над ней уменьшить до половины нормального атмосферного давления. Проверить это можно на следующем опыте. Нальём в небольшой стеклянный стакан воду, нагретую до 80 °С. Вода при нормальном давлении не кипит. Поставим стакан под стеклянный колпак на тарелку вакуумного насоса и будем откачивать воздух из-под колпака. Вскоре вода закипит (рис. 2.25), хотя температура её остаётся прежней.

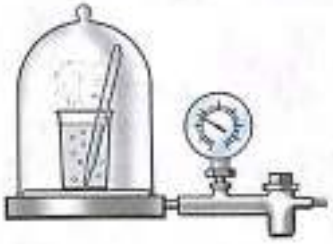


Рис. 2.25

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Итак, теория и опыт показывают, что температура кипения зависит от внешнего давления. При понижении внешнего давления температура кипения жидкости понижается, при повышении давления температура кипения повышается.

Изотерма пара. При температурах выше критической свойства пара достаточно хорошо описываются уравнением Менделеева—Клапейрона. Изотерма пара при этих температурах мало отличается от гиперболы. По мере понижения температуры изотерма пара становится всё более похожей на график изотермы ван-дер-ваальсова газа. График изотермы при критической темпера-



Рис. 2.26

туре обозначен на рисунке 2.26 символом $T_{кр}$; его форма существенно отличается от гиперболы.

Штриховая кривая отделяет области однофазного состояния от области двухфазного состояния. Слева вверху область соответствует жидкой фазе, справа от кривой и внизу лежит область ненасыщенного пара (газа), под штриховой кривой — область насыщенного пара над жидкостью (двухфазная среда).

Если изотермически сжимать ненасыщенный пар при температуре ниже критической, то концентрация молекул возрастёт и соответственно давление будет возрастать вплоть до давления насыщенного пара. При дальнейшем уменьшении объёма на дне сосуда образуется жидкость и устанавливается динамическое равновесие между насыщенным паром и жидкостью. Давление насыщенного пара остаётся неизменным, а с уменьшением объёма всё большая часть пара переходит в жидкость.

Горизонтальный участок на изотерме пара не связан с особыми свойствами насыщенного пара, а обусловлен процессом превращения части пара в жидкость. Уравнение Менделеева—Клапейрона (23.5) или (23.6) здесь с достаточной степенью точности выполняется, но надо помнить, что масса пара не остаётся при сжатии постоянной.

Процесс уменьшения объёма при дальнейшем сжатии прекращается, когда весь газ в сосуде превращается в жидкость. Резкое возрастание давления при дальнейшем уменьшении объёма объясняется малой сжимаемостью жидкости.

Относительная влажность воздуха. В атмосферном воздухе интенсивность испарения воды зависит от того, насколько близко давление паров воды к давлению насыщенных паров при данной температуре.

ЗАПОМНИТЕ

Отношение давления p паров воды к давлению p_0 насыщенного водяного пара при данной температуре, выраженное в процентах, называется **относительной влажностью** воздуха:

$$\varphi = \frac{p}{p_0} 100\%. \qquad (27.1)$$

С небольшой погрешностью можно в формуле (27.1) вместо отношения давлений подставить отношение плотностей.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Относительная влажность, равная 100%, означает установление динамического равновесия между процессами испарения и конденсации воды.

Точка росы. Так как давление насыщенного пара тем ниже, чем ниже температура, то при охлаждении воздуха находящийся в нём водяной пар при некоторой температуре становится насыщенным.

ЗАПОМНИТЕ Температура, при которой находящийся в воздухе водяной пар становится насыщенным, называется **точкой росы**.

Гигрометр. Точку росы можно определить с помощью *гигрометра*. Он представляет собой металлический сосуд, в который наливается легко испаряющаяся жидкость, например эфир. При испарении эфира происходит охлаждение стенок гигрометра, и при достижении точки росы на полированной поверхности появляются капли росы. Температуру гигрометра измеряют термометром. Для ускорения процесса испарения эфира через него с помощью груши продувается воздух (рис. 2.27).



Рис. 2.27

Принцип действия гигрометра другого типа, волосного, основано на свойстве обезжиренного человеческого волоса удлиняться при повышении влажности. В этом устройстве натянутый волос соединён со стрелкой прибора, показывающей на шкале относительную влажность воздуха.

Определение относительной влажности. По точке росы можно найти давление водяного пара в воздухе. Оно равно давлению насыщенного пара при температуре, равной точке росы. Отыскав затем в соответствующей таблице значения давления насыщенного водяного пара при температуре воздуха, можно рассчитать относительную влажность воздуха по формуле (27.1).



Рис. 2.28

Относительную влажность воздуха можно также определить с помощью прибора, называемого *психрометром* (рис. 2.28). Один термометр измеряет температуру воздуха, а другой — температуру ткани, смоченной водой. С поверхности влажной ткани происходит испарение воды, в результате температура влажной ткани понижается. Скорость испарения воды зависит от температуры и относительной влажности воздуха. Чем меньше паров в воздухе, тем интенсивнее идёт процесс испарения и тем ниже температура влажного термометра. С помощью специальной таблицы, называемой *психрометрической*, по разности показаний сухого и влажного термометров определяют относительную влажность воздуха.

Умение измерять относительную влажность воздуха и регулировать её необходимо в быту и на производстве. В сухом воздухе происходит очень быстрое испарение влаги с поверхности тела человека, высыхают слизистые оболочки дыхательных путей. При относительной влажности воздуха 100% прекращается испарение воды с поверхности тела и тем самым затрудняется возможность терморегуляции человеческого организма. Поэтому для человека вреден как слишком сухой, так и слишком влажный воздух. Наиболее благо-

приятной для человека является относительная влажность воздуха от 40 до 60%.

Определённую влажность воздуха необходимо поддерживать на многих производствах (ткацком, кондитерском и др.) для обеспечения нормальных условий производственного процесса, а также в библиотеках, музеях, хранилищах произведений искусства для обеспечения их лучшей сохранности.

Влажность. Относительная влажность. Точка росы

1. Что называется испарением? 2. Почему испарение жидкости сопровождается её охлаждением? 3. Что такое насыщенный пар? 4. При каких условиях происходит испарение жидкости? 5. Что такое кипение? 6. При каких условиях происходит конденсация пара? 7. Чем отличаются изотермы пара от изотерм идеального газа? 8. От чего зависит температура кипения жидкости? 9. Что такое относительная влажность воздуха? 10. Что называется точкой росы?

ЗАДАЧА. Температура воздуха 20 °С, точка росы 10 °С. Определите относительную влажность воздуха.

Решение. Из таблицы в справочнике находим, что давление p насыщенного водяного пара при 10 °С равно 1226 Па, а давление p_0 при 20 °С равно 2333 Па. Отсюда получаем $\varphi = \frac{p}{p_0}100\%$; $\varphi = \frac{1226\ \text{Па}}{2333\ \text{Па}}100\% = 52{,}6\%$.

РЕШИТЕ

27.1. В кастрюле-скороварке объёмом 3 дм^3 находится вода массой 0,5 кг при температуре 100 °С. Какая доля воды находится в газообразном состоянии под закрытой крышкой кастрюли?

27.2. Вычислите массу насыщенного водяного пара в комнате объёмом 200 м^3 при температуре 25 °С.

27.3. В воздухе насыщенный водяной пар содержится при 30 °С. Определите массу воды, выпавшей в виде росы из 1 м^3 воздуха при его охлаждении до 15 °С.

27.4. В воздухе объёмом 60 м^3 содержится насыщенный водяной пар при температуре 15 °С. Определите массу воды, которая может испариться в комнате при повышении температуры до 25 °С.

27.5. Давление водяного пара в воздухе при температуре 20 °С равно 2,33 кПа. Чему равна относительная влажность воздуха?

27.6. Температура воздуха 24 °С, точка росы 8 °С. Определите относительную влажность воздуха.

27.7. Относительная влажность воздуха при температуре 25 °С равна 60%. До какой температуры следует охладить воздух, чтобы началось выпадение росы?

27.8. Относительная влажность воздуха при температуре 20 °С равна 80%. Какой будет относительная влажность воздуха при температуре 30 °С, если давление водяных паров в нём не изменится?

1. Определите влажность воздуха доступными вам способами.
2. Продемонстрируйте с помощью подручных средств конденсацию жидкости из воздуха. Приведите другие примеры конденсации жидкости.

1. Принцип действия гигрометра.
2. Принцип действия волосного гигрометра.
3. Принцип действия психрометра.

§ 28. Свойства поверхности жидкостей

Повторите: свойства жидкости.

Поверхностная энергия. Рассмотрим явления, связанные с существованием у жидкости свободной поверхности, — так называемые *поверхностные явления*.

ИНТЕРЕСНО Выдувать мыльные пузыри — любимое занятие детей. Но, оказывается, из этого занятия можно извлечь много ценных сведений. Известно, что мыльный пузырь имеет почти правильную сферическую форму. Если прекращают выдувать пузырь, то он самопроизвольно сокращается и его поверхность уменьшается.

Все, вероятно, любовались маленькими капельками росы, которые на листьях растений принимают форму почти правильных шариков. Такую же форму имеют капли воды на парафине. Если эти капли привести в соприкосновение, то они сольются в одну большую каплю, форма которой также будет близка к шаровой.

Эти явления кажутся удивительными. Ведь мы привыкли видеть, что жидкость принимает форму сосуда, в котором она находится, и собственной формы не имеет. Оказывается, это не всегда верно.

Из геометрии известно, что шар имеет наименьшую площадь поверхности из всех тел равного объёма. Легко рассчитать, что если два одинаковых шарика сливаются в один, то площадь его поверхности будет меньше суммы площадей поверхностей обоих шариков. Таким образом, в описанных явлениях мы наблюдали самопроизвольное сокращение поверхности жидкости: жидкость принимала форму, при которой площадь её поверхности оказывалась минимальной.

Поместим бритвенное лезвие, слегка покрытое жиром, на поверхность воды. Оно не тонет. Но если погрузить это же лезвие в глубину воды, оно пойдёт ко дну. Значит, свойства поверхности жидкости отличаются от свойств остальной её части.

Как это можно объяснить? Всё дело в том, что молекулы на поверхности и в глубине жидкости находятся в разных условиях.

Молекула внутри жидкости взаимодействует с соседними молекулами, окружающими её со всех сторон (рис. 2.29).

Над поверхностью жидкости находится пар, плотность которого во много раз меньше, и взаимодействием его с молекулами жидкости можно пренебречь.

Молекулы, находящиеся на поверхности, взаимодействуют практически только с теми молекулами, которые находятся внутри жидкости. Казалось бы, что молекулы, находящиеся на поверхности, должны втянуться внутрь жидкости. Но все молекулы не могут уйти внутрь.

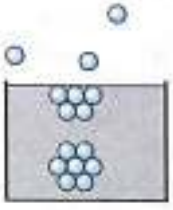


Рис. 2.29

На поверхности остаётся такое число молекул, при котором её площадь оказывается минимальной для данного объёма жидкости. Так, капли жидкости принимают форму, близкую к шаровой, при которой поверхность минимальна.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ При увеличении поверхности жидкости за счёт внешнего воздействия часть молекул из внутренних областей жидкости переходит на её поверхность. При таком переходе совершается работа против сил притяжения, действующих на молекулы, переходящие в поверхностный слой. Поэтому молекулы на поверхности жидкости *обладают большей энергией*, чем те же молекулы внутри жидкости.

Чем больше поверхность жидкости, тем большее число молекул обладает избыточной потенциальной энергией.

ЗАПОМНИТЕ Избыточную потенциальную энергию, которой обладают молекулы на поверхности жидкости, называют **поверхностной энергией**.
Отношение поверхностной энергии к площади поверхности называется **удельной поверхностной энергией**.

Удельную поверхностную энергию обозначают греческой буквой σ (сигма):

$$\sigma = \frac{E_{пов}}{S}.$$

В СИ единицей удельной поверхностной энергии является джоуль на квадратный метр: $1\ \frac{Дж}{м^2}$.

Поверхностной энергией обладают как жидкие, так и твёрдые тела. Ведь особые условия, в которых находятся молекулы на поверхности жидкости, характерны также и для поверхности твёрдых тел.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Устойчивое равновесие наступает при минимуме поверхностной энергии. Значит, сокращение поверхности жидкости, при котором уменьшается поверхностная энергия, — это самопроизвольный процесс, ведущий к состоянию устойчивого равновесия.

Поверхностная энергия уменьшается, если поверхность жидкости покрывается веществом, поверхностная энергия которого меньше, чем у данной жидкости.

Если такое вещество растворить в воде (например, мыло), то его молекулы концентрируются на поверхности воды, покрывая её плотным слоем. При этом поверхностная энергия системы уменьшается. Так, при малой концентрации мыла в воде (до 5%) на поверхности воды адсорбируется до 95% молекул мыла.

Поверхностное натяжение. Как измерить удельную поверхностную энергию жидкости? Очевидно, это можно сделать, определив работу, необходимую для образования поверхности.

Для вычисления этой работы воспользуемся свойством некоторых жидкостей, например мыльной воды, образовывать тонкие плёнки.

Рассмотрим мыльную плёнку, образованную на прямоугольнике с одной подвижной перекладиной длиной d (рис. 2.30, *а*). Если на эту перекладину не действует сила, поверхность жидкости будет сокращаться и подвижная перекладина притянется к неподвижной (рис. 2.30, *б*). Площадь поверхности сократится до минимума. Значит, со стороны жидкой плёнки вдоль её поверхности действует сила $\vec{F}_{\text{пов}}$.

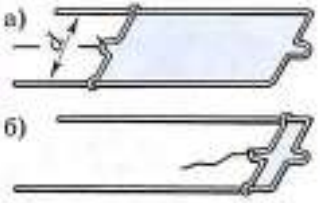


Рис. 2.30

ЗАПОМНИТЕ

Сила $\vec{F}_{\text{пов}}$, касательная к поверхности и перпендикулярная участку периметра, ограничивающего поверхность жидкости, называется **силой поверхностного натяжения**.

Плёнку можно растянуть и удерживать в равновесии (рис. 2.31), если к перекладине приложить внешнюю силу $\vec{F}$, равную по модулю силе поверхностного натяжения

$$\vec{F} = -\vec{F}_{\text{пов}}.$$

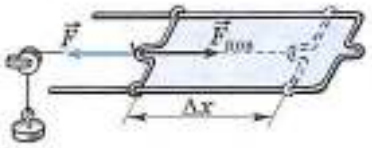


Рис. 2.31

Если под действием силы $\vec{F}$ подвижная перекладина сместится на Δx, то совершённая работа A будет положительна:

$$A = F\Delta x.$$

За счёт этой работы поверхность плёнки увеличится на ΔS.

Сила поверхностного натяжения $\vec{F}_{\text{пов}}$ совершает при этом отрицательную работу:

$$A' = -F_{\text{пов}}\Delta x. \qquad (28.1)$$

Так как плёнка — это тонкий слой жидкости, ограниченный двумя поверхностями, то $\Delta S = \Delta x l$, где $l = 2d$.

Поверхностная энергия при этом увеличится на

$$\Delta E_{\text{пов}} = \sigma\Delta S = \sigma l\Delta x, \qquad (28.2)$$

где $\Delta E_{\text{пов}}$ — изменение поверхностной энергии. Так как

$$A' = -\Delta E_{\text{пов}},$$

то, подставив в это выражение вместо A' и $\Delta E_{\text{пов}}$ их значения из формул (28.1) и (28.2), получим

$$-F_{\text{пов}}\Delta x = -\sigma l\Delta x.$$

Отсюда

$$\sigma = \frac{F_{\text{пов}}}{l}. \qquad (28.3)$$

Если проводить опыты с рамками, имеющими различную длину подвижной перекладины, то можно обнаружить, что абсолютное значение сил поверхностного натяжения пропорционально длине перекладины, а отноше-

ние $\frac{F_{пов}}{l}$ для плёнки из данной жидкости всегда одно и то же. Не зависит оно и от материала перекладины.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Следовательно, отношение модуля силы поверхностного натяжения, действующей на границе поверхности жидкости, к длине этой границы характеризует свойства свободной поверхности самой жидкости.

ЗАПОМНИТЕ Отношение модуля силы поверхностного натяжения к длине периметра, ограничивающего поверхность жидкости, называется **поверхностным натяжением**.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Из формулы (28.3) следует, что удельная поверхностная энергия σ имеет не только энергетический, но и силовой смысл: она равна поверхностному натяжению данной жидкости. Вот почему удельную поверхностную энергию часто также называют *поверхностным натяжением* и обозначают обе эти величины одной буквой σ.

Поверхностное натяжение может быть выражено в ньютонах на метр, что нисколько не противоречит выражению этой величины в джоулях на квадратный метр.

Действительно,

$$1\ \frac{Дж}{м^2} = 1\ \frac{Н \cdot м}{м^2} = 1\ \frac{Н}{м}.$$

Мыльные плёнки на проволочных каркасах различной формы образуют разнообразные фигуры. У этих фигур общим является то, что при заданном контуре их поверхности имеют наименьшие площади из всех возможных.

Собственная форма жидкости. Если жидкость находится только под действием силы тяжести, как, например, при свободном падении, все её частицы движутся с одинаковым ускорением, а следовательно, с одинаковой скоростью. Поэтому расстояния между частицами жидкости не меняются и жидкость находится в недеформированном состоянии. Значит, если на жидкость действует одна лишь сила тяжести, то она на форму жидкости не влияет. Действие же молекулярных сил, как известно, приводит к сокращению поверхности, и свободно падающая жидкость принимает форму шара. Такую форму жидкости наблюдали, например, космонавты в орбитальных полётах. Шаровая форма — это и есть собственная форма жидкости, которую она принимает под действием межмолекулярных сил.

Поверхностные явления. Удельная поверхностная энергия. Поверхностное натяжение

1. Почему молекулы поверхностного слоя обладают большей потенциальной энергией, чем молекулы внутри жидкости? 2. Что такое поверхностное натяжение? 3. Как можно измерить поверхностное натяжение жидкости? 4. Как свя-

зано поверхностное натяжение с избыточной потенциальной энергией молекул на поверхности жидкости? 5. Какую форму принимает жидкость в условиях невесомости?

РЕШИТЕ

28.1. Сферическую каплю ртути радиусом 3 мм разделили на две одинаковые капли. Какую работу пришлось при этом совершить для увеличения энергии поверхностного слоя? $\sigma_{Hg} = 0{,}465$ Дж/м^2.

28.2. Какая работа совершается при перемещении молекулы воды из глубины на поверхность? Диаметр молекулы воды равен примерно $4 \cdot 10^{-10}$ м. Определите отношение этой работы к средней кинетической энергии молекулы при комнатной температуре. $\sigma_{H_2O} = 0{,}073$ Дж/м^2.

28.3. Две малые капли воды одинакового радиуса при соприкосновении сливаются в одну. Как изменится площадь поверхности образовавшейся капли по сравнению с первоначальной площадью поверхности обеих капель? Почему происходит слияние капель?

28.4. Капля ртути во время падения имеет форму шара радиусом 5 мм. Падая в кювету, она дробится на 8 примерно одинаковых капель. Вычислите: а) отношение поверхностной энергии капли к её потенциальной энергии в момент соприкосновения с кюветой; б) отношение поверхностной энергии одной из получившихся при дроблении малых капель к её потенциальной энергии.

1. Налейте в тарелку воду и положите на воду 4 спички так, чтобы они составили квадрат.

Возьмите кусочек мыла и коснитесь им поверхности воды внутри квадрата из спичек. Объясните наблюдаемое явление.

Повторите опыт несколько раз и объясните результаты.

2. Возьмите стакан с водой и аккуратно поместите на поверхность жидкости (параллельно поверхности) несколько булавок.

Капните на булавку, находящуюся на поверхности жидкости, немного мыльного раствора или спирта. Объясните наблюдаемое явление.

1. Использование явления поверхностного натяжения в природе и технике.
2. Значение поверхностного натяжения в жизни животных и насекомых.
3. Значение поверхностного натяжения в жизни растений.

§ 29. Капиллярные явления

Повторите: поверхностное натяжение.

Явления смачивания и несмачивания.

ИНТЕРЕСНО Расплавленная капелька олова, помещённая на деревянную подставку, принимает форму шара. Но если провести паяльником с каплей олова по чистой меди, то олово растечётся по медному листу подобно тому, как вода растекается по поверхности чистого стекла. Для лужения железа (покрытия его оловом) протягивают железный лист через ванну с расплавленным оловом.

ЗАПОМНИТЕ Жидкость, которая растекается тонкой плёнкой по твёрдому телу, называют **смачивающей** данное твёрдое тело.

Жидкость, которая не растекается, а стягивается в каплю, называют **не смачивающей** это тело.

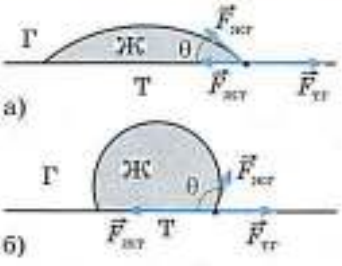


Рис. 2.32

Чем же объясняются явления смачивания и несмачивания?

Рассмотрим каплю жидкости на поверхности твёрдой пластины. Линия, ограничивающая поверхность капли на пластине, является границей поверхностей трёх тел — жидкости (Ж), твёрдого тела (Т) и газа (Г) (рис. 2.32, *а*, *б*). Поэтому в процессе установления равновесия капли жидкости на границе поверхностей этих тел на каждый элемент этой границы будут действовать три силы: сила поверхностного натяжения жидкости на границе с газом $\vec{F}_{ЖГ}$, сила поверхностного натяжения жидкости на границе с твёрдым телом $\vec{F}_{ЖТ}$, сила поверхностного натяжения твёрдого тела на границе с газом $\vec{F}_{ТГ}$. Будет ли жидкость растекаться по поверхности твёрдого тела или, наоборот, соберётся в каплю, зависит от соотношения этих сил. Растекание жидкости по поверхности твёрдого тела произойдёт, если $F_{ТГ} \geqslant F_{ЖТ} + F_{ЖГ}\cos\theta$ (см. рис. 2.32, *а*), где $F_{ЖГ}\cos\theta$ — проекция силы поверхностного натяжения $\vec{F}_{ЖГ}$ на горизонтальную поверхность.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Угол θ, образованный направлением силы поверхностного натяжения $\vec{F}_{ЖГ}$, действующей по касательной к поверхности жидкости, с поверхностью твёрдого тела, называется *краевым углом*. Он всегда отсчитывается внутрь жидкости.

Из условия равновесия $F_{ТГ} = F_{ЖТ} + F_{ЖГ}\cos\theta$ следует:

$$\cos\theta = \frac{F_{ТГ} - F_{ЖТ}}{F_{ЖГ}}, \qquad (29.1)$$

Как видно, если поверхностное натяжение на границе жидкость — твёрдое тело меньше, чем на границе твёрдое тело — газ (т. е. $F_{ЖТ} < F_{ТГ}$), то $\cos\theta > 0$,

краевой угол острый и жидкость смачивает твёрдое тело. Если же $F_{жт} > F_{тг}$, то $\cos\theta < 0$ и краевой угол θ тупой, т. е. жидкость не смачивает твёрдое тело (см. рис. 2.32, *б*).

Если же $F_{тг} - F_{жт} > F_{жг}$, то условие равновесия (29.1) не может быть выполнено, ибо косинус не может быть больше единицы. Это означает, что жидкость полностью смачивает твёрдое тело, отделяя его поверхность от газа.

Явления смачивания и несмачивания широко применяются в технике.

ИНТЕРЕСНО

Флотационный процесс. Рассмотрим основанный на явлениях смачивания и несмачивания технологический процесс обогащения руд, называемый флотацией[1].

В горных породах полезные ископаемые часто включены лишь в незначительных количествах в пустую породу. Такую бедную породу необходимо обогатить, т. е. отделить пустую горную породу от полезного ископаемого. Разделение породы, измельчённой в мелкий порошок, основано на смачивании водой одной её части, например пустой породы, и несмачивании другой — полезного минерала.

Во флотационную ванну, содержащую измельчённую руду, добавляют небольшое количество специально подобранного вещества (обычно дешёвые сорта масла), которое обладает способностью смачивать частицы полезного ископаемого, т. е. обволакивать их тонким слоем, и не смачивать пустую породу. Благодаря этому частицы полезного минерала, покрытые тонкой плёнкой масла, не смачиваются водой, а частицы пустой породы водой смачиваются.

Через флотационную ванну продувают воздух. Пузырьки воздуха вытесняют воду с масляного слоя на поверхности частиц полезного минерала, и поэтому эти частицы оказываются прилипшими к воздушным пузырькам (рис. 2.33). При этом если размер частицы достаточно мал, то прилипший к ней пузырёк воздуха позволяет частице всплыть на поверхность воды во флотационной ванне, где образуется пена, содержащая концентрат, обогащённый ценным минералом. Частицы пустой породы, смачиваемые водой, не прилипают к пузырькам воздуха. Поэтому они остаются на дне ванны.



Рис. 2.33

Моющее действие мыла. Всем хорошо известно, что без мыла бывает трудно отмыть руки. Почему мыльный раствор помогает отмыть загрязнения? Молекулы мыла обладают особым строением: они состоят из активной частицы, сильно взаимодействующей с водой, и из углеводородной цепи атомов — «хвоста», которые с водой взаимодействуют слабо.

При отмывании загрязнённой поверхности мыльным раствором молекулы мыла концентрируются (адсорбируются) на отмываемой поверхности и оказываются ориентированными активными концами в сторону воды. Поэтому поверхность тела лучше смачивается водой. Вода растекается по поверхности тела, вытесняя с неё частицы грязи.

[1] От французского слова *flotter* — плавать. Слово «флотация» означает «всплывать».

Мениск.

ЗАПОМНИТЕ **Мениски** — кривые поверхности, образующиеся на границе между смачивающими и несмачивающими жидкостями и твёрдым телом, соответственно с острым или тупым краевым углом (рис. 2.34 и 2.35).



Рис. 2.34



Рис. 2.35

Смачивающая жидкость образует вогнутый, а несмачивающая — выпуклый мениск. Образование мениска у жидкости в узких трубках приводит к некоторым интересным явлениям.

Капиллярные явления. Опустим в воду тонкую стеклянную трубку. Казалось бы, однородная жидкость и в широком сосуде, и в трубке должна установиться на одном уровне. Но опыт показывает, что вода, которая смачивает стенки трубки, поднимается в ней на некоторую высоту h над её уровнем в широком сосуде (рис. 2.36, *а*). Если аналогичный опыт провести с жидкостью, не смачивающей стенки трубки, то окажется, что уровень жидкости в трубке будет ниже, чем в широком сосуде (рис. 2.36, *б*).

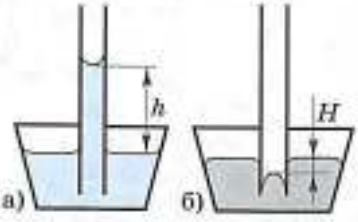


Рис. 2.36

ЗАПОМНИТЕ Описанные выше явления, обусловленные действием сил поверхностного натяжения на границе раздела несмешивающихся сред, называются **капиллярными**[1] **явлениями**, а трубки, в которых наблюдаются капиллярные явления, называются **капиллярными трубками** или **капиллярами**.

ИНТЕРЕСНО Капиллярные явления весьма распространены. Такие вещества, как керамика, бумага, ткань, дерево, кожа, почва, различные строительные материалы и другие пористые тела, имеют в себе множество каналов. Смачивающие вещества, придя в соприкосновение с такими телами, впитываются в них, поднимаясь по естественным капиллярам этих тел.

Вода, находящаяся в почве, может проникать в стены здания по капиллярным каналам таких пористых строительных материалов, как кирпич, известняк и др. Для предохранения строений от сырости их фундамент отделяют от кладки стен листами толя. Толь представляет собой лист картона, пропитанный смолой. Этот лист не смачивается водой.

Как объяснить капиллярные явления? Если жидкость полностью смачивает твёрдое тело (угол $\theta = 0$), то со стороны жидкости на линию её соприкосновения с твёрдым телом, длина которой $2\pi r$, действует направленная вниз сила поверхностного натяжения, модуль которой равен:

$$F = 2\pi r\sigma,$$

[1] От латинского слова *capillaris* — волосной.

где r — радиус капилляра; σ — поверхностное натяжение (рис. 2.37). Со стороны твёрдого тела на жидкость действует такая же по модулю сила $\vec{F}_1$, направленная вверх. Она и вызывает подъём жидкости в капилляре на такую высоту h, при которой сила тяжести $\vec{F}_т$, действующая на весь поднятый столб жидкости, равна по модулю силе $\vec{F}_1$, а следовательно, и силе поверхностного натяжения $\vec{F}$:

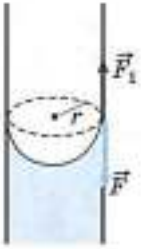


Рис. 2.37

$$F = F_т.$$

Отсюда

$$2\pi r\sigma = mg.$$

Масса поднятого столба жидкости равна $m = V\rho = \pi r^2 h\rho$, где ρ — плотность жидкости, а V — объём поднятого слоя.

Следовательно, $2\pi r\sigma = \pi r^2 hg\rho$, или

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}.$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Высота подъёма жидкости в капилляре тем больше, чем меньше радиус капилляра. Кроме того, высота подъёма зависит от свойств самой жидкости — её поверхностного натяжения и плотности.

Жидкость, не смачивающая стенки капилляра, опускается на расстояние H, определяемое по той же формуле.

Капилляр. Капиллярные явления. Краевой угол. Мениск

1. Чем объясняются явления смачивания и несмачивания? 2. Что называют краевым углом? 3. Что такое капилляр? 4. В чём заключаются капиллярные явления? 5. Весной землю пашут и боронуют. Объясните, почему это способствует сохранению влаги в почве.

РЕШИТЕ

29.1. На какую высоту может подняться вода в капиллярном канале диаметром 0,04 мм в стебле ржи?

29.2. В стеклянной капиллярной трубке на Земле вода поднимается на 1 см. На какую высоту поднимется вода в той же трубке на Луне, где ускорение свободного падения равно 1,6 м/с^2?

29.3. Глицерин поднялся в капиллярной трубке на 20 мм. Определите поверхностное натяжение глицерина, если диаметр канала трубки 1 мм. Плотность глицерина $1{,}26 \cdot 10^3$ кг/м^3. На какую высоту в этой трубке поднялась бы вода? Плотность воды 10^3 кг/м^3, а её поверхностное натяжение $7{,}3 \cdot 10^{-2}$ Дж/м^2.

1. Вычислите максимальный диаметр стального цилиндрика (иглы), который может плавать на поверхности воды при нанесении на его поверхность плёнки, не смачиваемой водой. Результат расчёта проверьте в опытах со швейными иглами. 2. Опустите в воду конец узкой полоски промокательной бумаги и измерьте, на какую максимальную высоту поднимется вода. По высоте подъёма воды оцените диаметр капиллярных каналов волокон бумаги.

3. Возьмите в кабинете физики набор капиллярных трубок. Исследуйте зависимость высоты подъёма различных жидкостей от свойств используемых жидкостей.

1. Использование явления капиллярности растениями.
2. Основные принципы обработки земли для сельскохозяйственных нужд (вспахивания, рыхления). Наиболее благоприятное для этого время года.

1. Возьмите два предметных стекла, соедините (например, с помощью клейкой ленты) их так, чтобы между ними был небольшой угол (можно воспользоваться спичкой).

Для того чтобы можно было более точно определять высоту подъёма жидкости между стёклами, сделайте прозрачную миллиметровку. Для этого возьмите плёнку для кодоскопа (убедитесь, что плёнка термостойкая, иначе вы испортите принтер) и с помощью принтера напечатайте на ней миллиметровую сетку. Полученную плёнку приклейте к одному из стёкол.



Далее полученную конструкцию (см. рис.) поместите вертикально в кювету с водой. Получите зависимость высоты подъёма жидкости от расстояния между стёклами.

Проведите аналогичный эксперимент с другой жидкостью. Сделайте выводы.

2. Известно, что капиллярные явления играют важную роль в природе и технике. Приведём некоторые примеры:

1) подъём жидкости в песке и грунте;
2) гидроизоляция при строительстве;
3) подъём керосина по фитилю в керосиновой лампе;
4) вытирание рук полотенцем;
5) движение насекомых по поверхности воды.

Дополните список предложенных выше примеров. Дайте пояснения каждого из них. Установите связь между явлением смачивания и капиллярным эффектом.

Расскажите о методе, используемом в химии для разделения вещества, основанном на явлении капиллярности.

§ 30. Кристаллические тела

Повторите: свойства твёрдых тел, кристаллы.

Анизотропия кристаллов. В природе часто встречаются твёрдые тела, имеющие формулу правильных многогранников. Такие тела назвали кристаллами. Изучение физических свойств кристаллов показало, что геометрически правильная форма не главная их особенность.

ЗАПОМНИТЕ Основное свойство кристаллических тел — **анизотропия** — зависимость физических свойств кристалла от направления.

Простейший пример анизотропии кристаллов — неодинаковая их прочность по различным направлениям. Это свойство наглядно проявляется при дроблении кристаллических тел.

ИНТЕРЕСНО Кусок каменной соли неправильной формы при раскалывании дробится на части, ограниченные плоскими поверхностями, пересекающимися под прямыми углами. Очевидно, эти плоскости перпендикулярны особым направлениям в образце каменной соли, по которым его прочность минимальна.

Исследования кристаллов показали, что тепловые, электрические и оптические свойства также неодинаковы по различным направлениям. Анизотропия физических свойств кристаллов и правильная внешняя форма получили объяснение на основе атомно-молекулярной теории строения вещества.

Плотная упаковка. Английский учёный Р. Гук (1635—1703) и голландский учёный Х. Гюйгенс (1629—1695) обратили внимание на возможность построения правильных многогранников из плотно укладываемых шаров. Они предположили, что кристаллы построены из плотно упакованных одинаковых шарообразных частиц — атомов или молекул. Независимо от них к такому же выводу пришёл М. В. Ломоносов. При плотной упаковке шаров в один плоский слой каждый шар оказывается окружённым шестью другими шарами, центры которых образуют правильный шестиугольник. Если укладку второго слоя вести по лункам между шарами первого слоя, то второй слой окажется таким же, как и первый, только смещённым относительно него в пространстве и т. д.

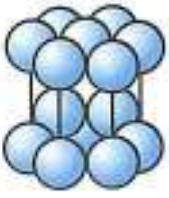


Рис. 2.38

При укладке шаров ряд за рядом способом плотной упаковки можно получить правильную шестигранную призму (гексагональная упаковка — рис. 2.38) или гранецентрированный куб (рис. 2.39). Кристаллы такой формы очень распространены. Форму шестигранной призмы имеют кристаллы цинка, магния, кадмия, гранецентрированную кубическую форму имеют кристаллы меди, алюминия, золота и ряда других металлов.

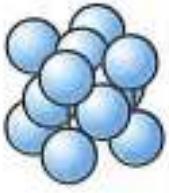


Рис. 2.39

Но этими двумя формами многообразие мира кристаллов не ограничивается. Существуют формы кристаллов, не соответст-

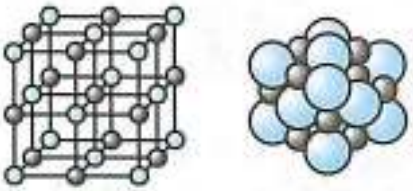


Рис. 2.40

вующие принципу плотной упаковки равновеликих шаров, на что имеются разные причины. Во-первых, кристалл может быть построен с соблюдением принципа плотной упаковки, но из атомов разных размеров. Во-вторых, отличие упаковки атомов или молекул от плотной может быть вызвано различием сил связей между атомами или молекулами по разным направлениям.

Пространственная решётка. Элементарная ячейка. Для наглядного представления внутренней структуры кристалла применяется способ его изображения с помощью пространственной кристаллической решётки, представляющей расположение центров атомов или молекул данного кристалла в пространстве (рис. 2.40).

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ В каждом кристалле можно указать три направления, вдоль которых кристаллическая решётка может переноситься так, что она переходит сама в себя, т. е. центры атомов (молекул, ионов) окажутся в аналогичных местах. Такие переносы называются *трансляциями*.

ЗАПОМНИТЕ Параллелепипед наименьших размеров, при трансляции которого вместе с частицами, находящимися внутри его, можно получить всю кристаллическую решётку, называется **элементарной ячейкой** кристалла (рис. 2.41).

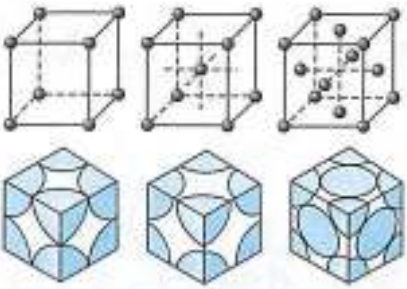


Рис. 2.41

Элементарная ячейка в зависимости от структуры кристалла может представлять собой куб, прямоугольный или косоугольный параллелепипед.

Симметрия кристаллов. Кристаллы могут иметь форму различных призм, основаниями которых могут быть правильный треугольник, квадрат, параллелограмм и шестиугольник. В основе классификации кристаллов и объяснения их физических свойств может лежать не только форма элементарной ячейки, но и другие виды симметрии, например поворот вокруг оси.

ЗАПОМНИТЕ **Осью симметрии** называют прямую, при повороте вокруг которой на 360° кристалл (или его решётка) несколько раз совмещается сам с собой. Число этих совмещений называют **порядком оси**.

Существуют кристаллические решётки, обладающие осями симметрии второго, третьего, четвёртого и шестого порядка. Возможна симметрия кристаллической решётки относительно плоскости симметрии, а также комбинации разных видов симметрии.

ИНТЕРЕСНО Русский учёный Е. С. Фёдоров (1853—1919) установил, что в природе может существовать только 230 различных пространственных групп, охватывающих все возможные, изученные к тому времени кристаллические структуры. Лишь в 1982 г. были открыты новые типы структур, не укладывавшиеся в классическую кристаллографию (квазикристаллы и модулированные кристаллы).

Монокристаллы и поликристаллы. Кристаллические тела могут быть монокристаллами и поликристаллами.

ЗАПОМНИТЕ **Монокристаллом** называют одиночный кристалл, имеющий макроскопическую упорядоченную кристаллическую решётку.

Монокристаллы обычно обладают геометрически правильной внешней формой, но этот признак не является обязательным.

ЗАПОМНИТЕ **Поликристаллом** называют тело, структура которого представляет собой совокупность сросшихся друг с другом хаотично ориентированных маленьких кристаллов — кристаллитов.

Большинство встречающихся в природе и получаемых в технике твёрдых тел представляют собой поликристаллы. Поликристаллическую структуру чугуна можно обнаружить, если рассматривать с помощью лупы образец на изломе. Наличие кристаллитов в поликристалле можно обнаружить, рассматривая в микроскоп отшлифованную и обработанную кислотой поверхность.

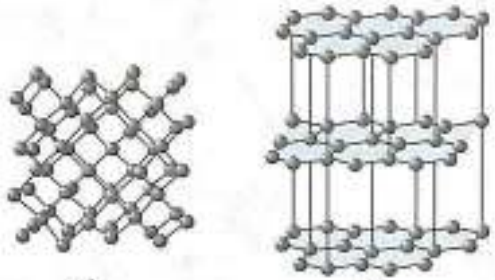
ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ В отличие от монокристаллов поликристаллы изотропны, т. е. их свойства одинаковы во всех направлениях.

Полиморфизм.

ЗАПОМНИТЕ Возможность существования веществ в двух или более фазовых разновидностях (модификациях), различающихся физическими свойствами, называется **полиморфизмом**.

Очень многие вещества в кристаллическом состоянии полиморфны. Каждая модификация устойчива в определённом интервале температур и давлений. Из 9 кристаллических фаз воды только одна устойчива при атмосферном давлении. Остальные 8 фазовых состояний льда существуют при высоких давлениях и имеют плотность, большую, чем у воды. Одна из них при давлении $2 \cdot 10^9$ Па имеет температуру плавления +80 °С, т. е. существует «горячий лёд».

Упорядоченное расположение атомов или молекул в кристалле определяется действием сил межатомного и межмолекулярного взаимодействия. Тепловое движение частиц нарушает эту упорядоченную структуру. При каждом сочетании давления и температуры реализуется тот тип укладки частиц, который в данном случае наиболее устойчив и энергетически выгоден. На рисунке 2.42 изображены решётки алмаза (*а*) и графита (*б*), на рисунке 2.43 — соответствующая фазовая диаграмма. Различие в упаковке атомов углерода в решётках графита и алмаза определяет различие их физических свойств.



а) б)

Рис. 2.42

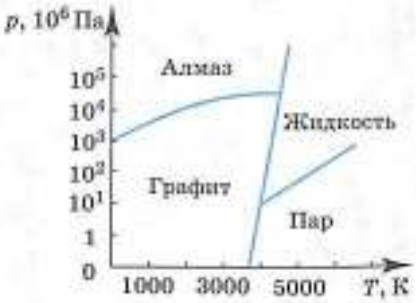


Рис. 2.43

У многих кристаллов неустойчивое в данных условиях фазовое состояние может сохраняться длительное время, поскольку благодаря плотной упаковке частиц и малому числу дефектов перестройка кристаллической решётки весьма затруднена. Например, алмаз при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении не превращается самопроизвольно в более устойчивую модификацию — графит. Поэтому алмазы, полученные при высоких температурах и давлениях, можно использовать в обычных условиях.

Аморфные тела.

ЗАПОМНИТЕ **Аморфными** называются твёрдые тела, у которых отсутствует кристаллическая структура.

Фактически аморфные тела, у которых упаковка частиц сохраняет ближний порядок, — это переохлаждённые жидкости. В природе аморфные тела встречаются редко. Примером аморфных тел могут служить куски затвердевшей смолы — янтарь, изделия из стекла.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Аморфные тела изотропны. Изотропность аморфных тел означает одинаковость физических свойств по всем направлениям.

Экспериментальные методы изучения внутреннего строения кристаллов. Представления о периодической структуре кристаллов и симметрии расположения атомов в них имеют строгое экспериментальное подтверждение. Данные о взаимном расположении атомов в кристаллах и расстояниях между ними получают из опытов, в которых через кристаллы пропускают пучки электронов, ионов, нейтронов, рентгеновское излучение и наблюдают их отражение и рассеяние. Наглядную картину строения кристаллов можно получить с помощью ионного проектора.

ИНТЕРЕСНО По внешнему виду и конструкции ионный проектор напоминает электронно-лучевую трубку. Стеклянная колба заполняется водородом или гелием при давлении 0,1 Па.

В сильном электрическом поле вблизи положительно заряженной иглы атомы гелия поляризуются и притягиваются к острию. У поверхности острия с них срывается по одному электрону, и они становятся положительными



Рис. 2.44



Рис. 2.45

ионами. Чаще всего ионизация атомов гелия происходит около выступающих участков поверхности острия, вблизи атомов у краёв «ступенек» кристаллической решётки (рис. 2.44), где напряжённость электрического поля максимальна. Образовавшиеся положительные ионы движутся прямолинейно к отрицательно заряженному экрану. Соударяясь с экраном, они вызывают его свечение, создавая увеличенное в $(5—10) \cdot 10^6$ раз изображение поверхности острия. Пунктир из светлых точек на рисунке 2.45 — это края «ступенек» кристалла вольфрама, каждая светлая точка соответствует местоположению атома в кристаллической решётке.

Изотропия и анизотропия. Элементарная ячейка. Трансляции. Монокристалл и поликристалл. Полиморфизм. Аморфные и кристаллические тела

1. Какое свойство наиболее характерно для кристаллических тел? 2. В чём причина анизотропии физических свойств монокристаллов? 3. Что такое элементарная ячейка? 4. Что такое ось симметрии кристалла? 5. Какие опыты доказывают правильность представлений об упорядоченном расположении частиц в кристалле? 6. Чем отличается поликристалл от монокристалла? 7. Чем отличаются аморфные тела от поликристаллов?

1. Методы получения монокристаллов.
2. Методы исследования структуры кристаллических тел.

Приготовьте дома насыщенный раствор поваренной соли. Профильтруйте его и поставьте на несколько дней в тёплое место. Из образовавшихся на дне сосуда кристаллов выберите наиболее крупный и прозрачный. Раствор ещё раз профильтруйте и положите в него один выбранный кристалл для дальнейшего выращивания. Полученный через несколько дней кристалл принесите в школу для демонстрации на уроке физики.

Для проведения описанного выше эксперимента можно взять специальный набор по кристаллизации.

§ 31. Механические свойства твёрдых тел

Повторите: деформация, сила упругости, закон Гука.

Атомы и молекулы в твёрдых телах совершают тепловые колебания около равновесных положений, в которых энергия минимальна. При уменьшении расстояний между атомами возникают силы отталкивания, а при увеличении расстояний между ними — силы притяжения. Это и обусловливает механическую прочность твёрдых тел, т. е. их способность противодействовать изменению формы и объёма. Растяжению тел препятствуют силы межатомного притяжения, а сжатию — силы отталкивания. Этими же силами объясняются упругие свойства твёрдых тел.

Деформация и напряжение. Деформацию сжатия и растяжения можно характеризовать *абсолютным удлинением* Δl, равным разности длин образца после растяжения l и до него l_0:

$$\Delta l = l - l_0.$$

Абсолютное удлинение Δl при растяжении положительно, при сжатии отрицательно.

Отношение абсолютного удлинения Δl к первоначальной длине l_0 образца называют *относительным удлинением* ε:

$$\varepsilon = \frac{|\Delta l|}{l_0}.$$

ЗАПОМНИТЕ Физическая величина, равная отношению модуля силы упругости $\vec{F}$, возникающей при деформации, к площади поперечного сечения S образца, перпендикулярного вектору силы $\vec{F}$, называется **механическим напряжением** σ:

$$\sigma = \frac{F}{S}.$$

За единицу механического напряжения в СИ принят паскаль (Па):

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2.$$

Модуль упругости.

ЗАПОМНИТЕ Деформация называется **упругой**, если после прекращения действия силы размеры и форма тела восстанавливаются.

Неупругая деформация называется **пластической.**

При малых (упругих) деформациях растяжения и сжатия отношение механического напряжения σ к относительному удлинению ε называется **модулем упругости** E (модулем Юнга).

Модуль упругости одинаков для образцов любой формы и размеров, изготовленных из данного материала:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{Fl_0}{|\Delta l|S}.$$

Модуль упругости E характеризует механические свойства материала независимо от конструкции изготовленных из него деталей. Поскольку относи-

тельное удлинение — отвлечённое число, то модуль упругости выражается в тех же единицах, что и механическое напряжение.

Диаграмма растяжения.

ЗАПОМНИТЕ Графическое изображение зависимости относительного удлинения образца от приложенного к нему напряжения называется **диаграммой растяжения**.

Эта зависимость является одной из важнейших характеристик механических свойств твёрдых тел. По оси ординат откладывается механическое напряжение σ, приложенное к образцу, а по оси абсцисс — относительное удлинение ε (рис. 2.46).

При небольших напряжениях относительное удлинение прямо пропорционально напряжению, а после снятия нагрузки размеры тела полностью восстанавливаются. Такая деформация, как уже говорилось, называется упругой.

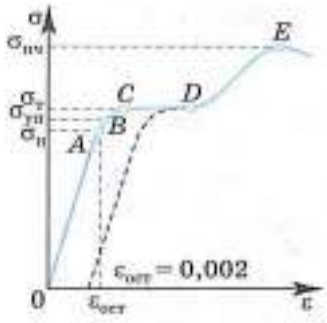


Рис. 2.46

ЗАПОМНИТЕ Максимальное напряжение $\sigma_п$, при котором деформация ещё остаётся упругой, называется **пределом пропорциональности** (точка A).

Если ещё увеличить нагрузку, то деформация становится нелинейной, напряжение перестаёт быть прямо пропорциональным относительному удлинению. Тем не менее при небольших нелинейных деформациях после снятия нагрузки форма и размеры тела восстанавливаются (участок AB диаграммы).

ЗАПОМНИТЕ Максимальное напряжение, при котором ещё не возникают заметные остаточные деформации, называют **пределом упругости** $\sigma_{уп}$.

Предел упругости превышает предел пропорциональности лишь на сотые доли процента.

ЗАПОМНИТЕ Деформации, при которых образец после снятия нагрузки не восстанавливает свою форму или первоначальные размеры, называют **остаточными** или **пластическими**.

Это происходит при напряжениях, превышающих предел упругости $\sigma_{уп}$.

В области пластической деформации (участок BC) деформация происходит не пропорционально увеличению напряжения. На горизонтальном участке CD материал «течёт» — деформация возрастает при неизменном напряжении.

ЗАПОМНИТЕ Напряжение $\sigma_т$ (ордината точки C), при котором материал «течёт», называют **пределом текучести**.

Если в области пластических деформаций снять напряжение с тела, то его размеры не будут равны первоначальным. Разгрузка изображается пунктирной кривой на диаграмме рисунка 2.46. У тела сохраняется *остаточная деформация* $\varepsilon_{ост}$.

ЗАПОМНИТЕ Материалы, у которых область текучести CD значительна и которые могут без разрушения выдерживать большие деформации, называют **пластичными**.

Пластичны медь, золото, пластилин.

ЗАПОМНИТЕ Материалы, у которых область текучести почти отсутствует и которые без разрушения могут выдержать лишь небольшие деформации, называют **хрупкими**.

Примерами хрупких материалов могут являться стекло, кирпич, бетон, чугун.

Материал в процессе деформации может упрочняться. В этом можно убедиться при сгибании толстого медного прута или пластины. Для того чтобы разогнуть образец, требуются заметно бóльшие усилия, чем для его сгибания. Это явление называется *наклёпом*.

После точки E кривая идёт вниз. Это значит, что дальнейшая деформация вплоть до разрыва происходит при всё меньшем напряжении.

ЗАПОМНИТЕ Наибольшее напряжение $\sigma_{пч}$, которое способен выдерживать образец без разрушения, называется **пределом прочности**.

Запас прочности. Для того чтобы машины и различные сооружения, здания, мосты были надёжными, при их проектировании конструкторы учитывают необходимый запас прочности. Очевидно, что все эти машины и сооружения должны работать в области упругих деформаций.

ЗАПОМНИТЕ **Коэффициентом безопасности** (или запасом прочности) называется отношение предела пропорциональности $\sigma_п$ данного материала к максимальному напряжению $\sigma_д$, которое будет испытывать деталь конструкции в работе:

$$n = \frac{\sigma_п}{\sigma_д}.$$

В зависимости от необходимой прочности различных деталей и конструкций коэффициент безопасности выбирают обычно в пределах от 2 до 10.

Упругая и неупругая деформации. Напряжение. Модуль упругости. Предел упругости. Предел текучести. Предел прочности. Остаточные и пластические деформации

1. Что называется относительным удлинением? 2. Что называется механическим напряжением? 3. Что является единицей СИ механического напряжения? 4. Что такое модуль упругости? Какова единица СИ модуля упругости? 5. Зависимость между какими величинами представляет диаграмма растяжения? 6. Что такое предел пропорциональности (предел упругости)? 7. Что называется пределом текучести? 8. Как возникает остаточная деформация? 9. Что называется пределом прочности? 10. Что такое запас прочности?

ЗАДАЧА. Какой диаметр должен иметь стальной трос подъёмного крана, если максимальная масса поднимаемого груза равна 10 т? Предел прочности стальной проволоки $8{,}5 \cdot 10^8$ Па, запас прочности должен быть равен 6.

Решение. Предел прочности определяется отношением модуля максимальной силы упругости к площади поперечного сечения: $\sigma_{\text{п}} = \frac{F_{\text{у}}}{S}$.

Так как запас прочности равен 6, трос должен выдержать нагрузку, в 6 раз превышающую ту, которая возникает при подъёме груза массой 10 т. Следовательно, $\sigma_{\text{п}} = \frac{6mg}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{24mg}{\pi D^2}$.

Отсюда диаметр троса равен:

$$D = \sqrt{\frac{24mg}{\pi\sigma_{\text{п}}}}; \qquad D = \sqrt{\frac{24 \cdot 10^4 \cdot 10}{3{,}14 \cdot 8{,}5 \cdot 10^8}}\,(\text{м}) \approx 3 \cdot 10^{-2}\ \text{м} = 3\ \text{см}.$$

РЕШИТЕ

31.1. Чему равно абсолютное удлинение стального троса длиной 12 м и площадью поперечного сечения 2 см^2 при подвешивании к нему груза массой 2 т? Модуль упругости стали $2 \cdot 10^{11}$ Па.

31.2. К алюминиевой проволоке длиной 2 м и площадью поперечного сечения 4 мм^2 подвесили груз, под действием которого она удлинилась на 1 мм. Определите силу упругости, возникающую в проволоке. Модуль упругости алюминия $7{,}1 \cdot 10^{10}$ Па.

31.3. К медной проволоке длиной 1,2 м и площадью поперечного сечения 5 мм^2 подвесили груз массой 10 кг. Определите работу растяжения проволоки. Модуль упругости меди $1{,}18 \cdot 10^{11}$ Па.

31.4. К алюминиевой проволоке длиной 10 м и площадью поперечного сечения 7 мм^2 подвесили груз массой 10 кг. Определите абсолютное и относительное удлинение проволоки. Модуль упругости алюминия $7{,}1 \cdot 10^{10}$ Па.

31.5. Определите максимальную высоту здания из кирпича, если предел прочности кирпича на сжатие $1{,}5 \cdot 10^7$ Па, плотность кирпича $1{,}8 \cdot 10^3$ кг/м^3, а необходимый запас прочности равен 6.

31.6. Какой диаметр должен иметь стальной трос подъёмного устройства, если максимальная масса поднимаемого груза равна 5 т? Предел прочности троса 10^9 Па, запас прочности должен быть равен 6.

31.7. Масса кабины лифта с пассажирами 500 кг. Кабина подвешена на тросе, изготовленном из стали с пределом прочности на растяжение $5{,}5 \cdot 10^8$ Па. Лифт движется вверх с ускорением 0,5 м/с^2. Каким запасом прочности обладает трос, если площадь его поперечного сечения 1,4 см^2?

31.8. Для взятия пробы грунта со дна океана используется специальный прибор, опускаемый на стальном тросе. Чему равна предельная глубина погружения прибора, если предел прочности на разрыв стального троса $5 \cdot 10^8$ Па? Масса прибора по сравнению с массой троса пренебрежимо мала. Плотность стали $7{,}8 \cdot 10^3$ кг/м^3, плотность морской воды $1{,}03 \cdot 10^3$ кг/м^3.

Возьмите кусок резины и растяните её. Опишите поведение резины.

1. Процессы, происходящие внутри растягиваемого куска резины.
2. Процессы, происходящие внутри деформируемого твёрдого тела.
3. Виды деформации и методы их наблюдения.

§ 32*. Получение и применение кристаллов

Повторите: кристалл.

Дефекты в кристаллах. Способы повышения прочности твёрдых тел.

Сравнение реальной прочности кристаллов со значением, полученным на основании теоретических расчётов, обнаруживает весьма существенные расхождения. Теоретический предел прочности в десятки и даже в сотни раз превышает значения, получаемые при испытаниях реальных образцов.

Оказалось, что причина расхождения теории и эксперимента — наличие внутренних и поверхностных дефектов в строении кристаллических решёток.

ЗАПОМНИТЕ **Точечными дефектами** в идеальной кристаллической решётке называются дефекты, возникающие в результате замещения собственного атома чужеродным, внедрения атома в междоузлие, отсутствия атома в одном из узлов кристаллической решётки (рис. 2.47).

Нарушения в порядке расположения атомных плоскостей в кристалле (наличие лишней полуплоскости) называются **дислокациями** (рис. 2.48, *а*).

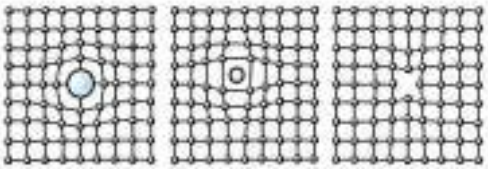


Рис. 2.47

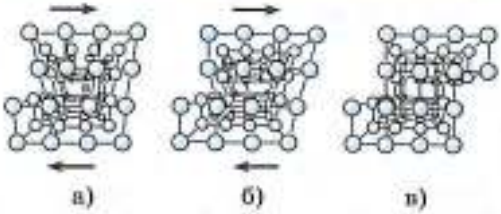


Рис. 2.48

Деформация и разрушение кристалла с дефектом типа дислокации облегчаются, так как вместо одновременного разрыва всех связей между атомами двух плоскостей становится возможным поочерёдный разрыв небольшого числа связей между атомами с постепенным перемещением дефекта в кристалле (рис. 2.48, *б*, *в*).

Для получения кристаллических материалов с высокой прочностью нужно выращивать монокристаллы по возможности без дефектов. Это очень сложная задача, и поэтому в практике этот путь пока широкого распространения не получил. Удаётся из углерода и некоторых минералов выращивать лишь очень короткие нитевидные сверхпрочные кристаллы с очень малым числом дефектов в решётке.

Большинство современных методов упрочнения материалов основано на другом способе. Для упрочнения кристаллов с дефектами в решётке вместо устранения дефектов можно создать условия, при которых перемещение дефектов в кристалле затрудняется. Препятствием для перемещения дефектов в кристалле могут служить другие дефекты, специально созданные в кристаллической решётке. Так, для увеличения прочности стали применяется *легирование*.

ЗАПОМНИТЕ **Легированием** называется процесс введения в расплав небольших добавок хрома, вольфрама и других элементов.

Внедрение атомов чужеродных элементов в кристаллы железа затрудняет перемещение дефектов при деформации кристаллов, при этом прочность стали повышается примерно в три раза.

Приблизить практическую прочность металлов к теоретической можно и другим способом — высокоскоростной кристаллизацией. Чем быстрее отводится тепло от затвердевшего слитка, т. е. чем больше скорость кристаллизации, тем меньше размеры кристаллов и тем тоньше межзёренные прослойки. Такая структура обладает лучшими физическими и механическими характеристиками. Но крупные слитки металла невозможно охладить быстро. Сверхскоростное охлаждение до 10^4 К в секунду осуществляется в «слитках» размером 5—500 мкм. Для этого расплавленный металл струёй нейтрального газа с помощью форсунки распыляется в мельчайшую пыль. В таких условиях гранулы затвердевают за ничтожные доли секунды. Затем эти гранулы спрессовывают при давлении $2 \cdot 10^8$ Па и температуре 1200 °С.

На основе высокоскоростной кристаллизации и последующего горячего прессования разработана технология производства, например, дисков из никелевых сплавов для газотурбинных двигателей. Таким способом жаропрочность дисков паровых и газовых турбин была повышена более чем в полтора раза. Это дало возможность уменьшить массу агрегатов, повысить рабочие температуры, увеличить срок службы двигателей.

Получение монокристаллов. Кристаллы ряда элементов и многих химических веществ обладают замечательными механическими, электрическими, магнитными и оптическими свойствами. Так, например, алмаз твёрже любого другого материала, встречающегося на Земле. Кристаллы кварца и слюды, германия и кремния обладают электрическими свойствами, обеспечивающими им широкое применение в электротехнике и электронике. Кристаллы флюорита, турмалина, исландского шпата и многие другие кристаллы находят применение при изготовлении оптических приборов.

В природе монокристаллы большинства веществ без дефектов встречаются очень редко, поэтому такие кристаллы с древнейших времён люди называют драгоценными камнями и ценят их не за особые механические или другие физические свойства, а лишь за их редкость и красоту.

Развитие науки и техники привело к тому, что многие редко встречающиеся в природе кристаллы стали очень нужными для изготовления деталей приборов, машин, для выполнения научных исследований. Потребность во многих кристаллах возросла настолько, что удовлетворить её за счёт расширения масштабов выработки старых и поисков новых природных месторождений оказалось невозможным. Возникла задача разработки технологии искусственного изготовления монокристаллов многих элементов и химических соединений.

Большинство драгоценных камней являются кристаллами широко распространённых в природе химических элементов и соединений. Так, алмаз — это

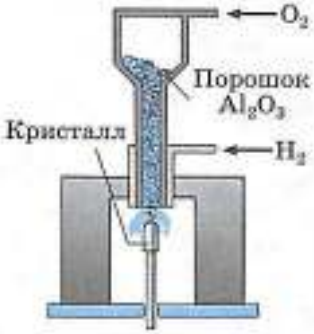


Рис. 2.49

кристалл углерода, рубин и сапфир — кристаллы оксида алюминия с различными примесями. Поэтому разработка сравнительно простого способа изготовления драгоценного камня приводит к тому, что он перестаёт быть драгоценным.

Наиболее распространённые способы выращивания монокристаллов — кристаллизация из расплава и кристаллизация из раствора.

Трудности выращивания монокристаллов многих веществ связаны с тем, что эти вещества плохо растворимы и имеют высокую температуру плавления. Например, для получения кристалла рубина нужно расплавить порошок оксида алюминия, температура плавления которого 2030 °С. Порошок оксида алюминия высыпается тонкой струёй в кислородно-водородное пламя, плавится и в виде капель попадает на стержень из тугоплавкого материала. На стержне постепенно вырастает кристалл рубина (рис. 2.49).

Кристаллы из раствора выращивают при медленном испарении растворителя из насыщенного раствора или при медленном понижении температуры раствора.

Применение кристаллов. Применение кристаллов в науке и технике очень разнообразно. Около 80% всех добываемых природных алмазов и все искусственные алмазы используются в промышленности.

Алмазные инструменты применяются для обработки деталей из самых твёрдых материалов, используются в буровых установках при разведке и добыче полезных ископаемых. Алмазы служат опорными камнями в хронометрах высшего класса для морских судов и в других особо точных приборах. На алмазных подшипниках не обнаруживается никаких следов износа даже после 25 000 000 оборотов.

Из 1 кг синтетического рубина удаётся изготовить около 40 000 опорных камней для часов. Рубиновые нитеводители практически не изнашиваются. Новая область для широкого применения рубинов в научных исследованиях и в технике открылась с изобретением рубинового лазера — прибора, в котором рубиновый стержень служит мощным источником света, испускаемого в виде тонкого светового пучка.

Исключительная роль выпала на долю кристаллов в современной электронике. Большинство полупроводниковых электронных приборов изготовлено из кристаллов германия или кремния.

Кристаллы и жизнь. Кристалл обычно служит символом неживой природы. Однако грань между живым и неживым установить очень трудно, и понятия «кристалл» и «жизнь» не являются взаимоисключающими. Простейшие живые организмы — вирусы — могут соединяться в кристаллы. Конечно, в кристаллическом состоянии они не обнаруживают никаких признаков живого, так как сложные жизненные процессы в кристаллах протекать не могут. Но при изменениях внешних условий на благоприятные (таковыми для виру-

сов являются условия внутри клеток живого организма) они начинают двигаться, размножаться.

Кристалл и живой организм представляют собой примеры осуществления крайних возможностей в природе. В кристалле неизменными остаются не только сами атомы и молекулы, но также их взаимное расположение в пространстве. В живом организме не только не существует сколько-нибудь постоянной структуры в расположении атомов и молекул, но ни на одно мгновение не остаётся неизменным его химический состав. В процессе жизнедеятельности организма одни химические соединения разлагаются на более простые, другие, наоборот, синтезируются из простых.

Но при всех химических процессах, протекающих в живом организме, организм остаётся самим собой в течение десятков лет! Более того, потомки каждого живого организма являются удивительно близкой его копией! Следовательно, в клетках любого животного или растения имеется что-то постоянное, неизменное, способное управлять химическими процессами, протекающими в них. Такими носителями «программы» процессов, протекающих в живой клетке, оказались молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты, называемой кратко ДНК. В клетках человеческого организма одна такая молекула имеет длину несколько сантиметров! Имея очень малую толщину, молекулы укладываются спирально, клубком внутри клеток, видимых лишь в микроскоп.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Молекулы ДНК не только управляют процессами жизнедеятельности клетки, но и несут в себе полную информацию о строении и развитии всего живого организма из одной клетки! С полным основанием можно сказать, что молекула ДНК является основой жизни, носителем всех наследственных признаков организма.

Согласно современным данным молекула ДНК представляет собой двойную спираль, составленную из небольшого числа сравнительно простых молекулярных соединений, повторяющихся в строго определённом для данного вида порядке. Диаметр молекулы ДНК равен $2 \cdot 10^{-9}$ м, а длина может достигать нескольких сантиметров. Такие молекулы с точки зрения физики рассматриваются как особый вид твёрдого тела — одномерные апериодические кристаллы. Следовательно, кристаллы — это не только символ неживой природы, но и основа жизни на Земле.

Дефекты кристаллов. Дислокация. Легирование

1. Какие дефекты бывают в структуре кристаллов? 2. Какое влияние на свойства кристаллов оказывают дефекты в строении кристаллической решётки? 3. Какими способами повышают прочность кристаллических тел? 4. Где применяются кристаллы на практике? 5. Для чего выращивают искусственные кристаллы? 6. Какими способами получают искусственные кристаллы? 7. Какова роль кристаллов в живых организмах?

Легирование материалов и его цели.

§ 33. Жидкие кристаллы

Повторите: кристаллы.

Большинство веществ может находиться в трёх агрегатных состояниях — твёрдом, жидком и газообразном. Однако некоторые органические вещества, молекулы которых имеют нитевидную форму или форму плоских пластин, могут находиться в особом состоянии, обладая одновременно свойствами анизотропии и текучести.

ЗАПОМНИТЕ Состояние, сочетающее свойства кристалла и жидкости, называют **жидкокристаллическим.**

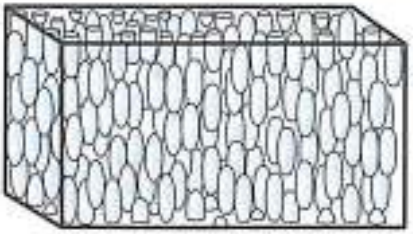


Рис. 2.50

В среднем на каждые 200 сложных органических соединений приходится одно, способное к образованию жидких кристаллов.

Строение жидких кристаллов. Наиболее простые жидкие кристаллы образуются длинными сигарообразными или нитевидными молекулами. В жидкокристаллическом состоянии «сигары» параллельны друг другу, но беспорядочно сдвинуты вдоль своих осей (рис. 2.50).

Одновременное сочетание свойства кристаллов — анизотропии — и свойства жидкости — текучести — объясняется тем, что вытянутые молекулы, как и в «настоящих» кристаллах, расположены упорядоченно. Но в отличие от кристаллов, где дальний порядок расположения атомов или молекул имеется во всех трёх направлениях, в жидких кристаллах он существует лишь в одном направлении. Молекулы жидкого кристалла совершают тепловое движение весьма своеобразно. Их центры масс движутся хаотично, но оси молекул при этом перемещаются параллельно самим себе и осям других соседних молекул, сохраняя взаимную ориентацию. Зависимость свойств вещества от направления ориентации молекул вызывает макроскопическую анизотропию в большой области.

Жидкокристаллическое состояние существует в определённом для каждого вещества интервале температур. Удлинённая форма молекул вещества — условие необходимое, но недостаточное для образования жидких кристаллов. Например, молекулы парафина $CH_2 — CH_2 — CH_2$... длинные, но жидких кристаллов не образуют потому, что им не хватает жёсткости и они легко изгибаются. Но и жёсткость не является достаточным условием. Имеется много веществ с длинными и жёсткими молекулами, но неспособных образовывать жидкокристаллическое состояние.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Способность вещества образовывать жидкие кристаллы определяется не только формой и механическими свойствами молекул, но и характером сил молекулярного взаимодействия.

Оптические свойства жидких кристаллов. Ориентация молекул распространяется обычно не на весь объём жидкого кристалла, а лишь на небольшие его области — домены. На границе раздела двух доменов происходит частичное отражение и преломление света. Поэтому жидкие кристаллы непрозрачны, как молоко.

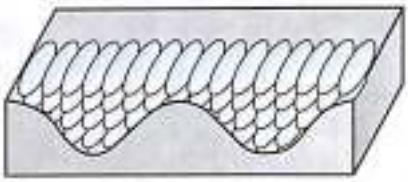


Рис. 2.51

Но если разместить жидкий кристалл между двумя параллельными пластинами с зазором 0,01—0,1 мм с параллельными микробороздами глубиной и шириной 10—100 нм, то все молекулы тонкого слоя будут ориентированы одинаково, а полученная плёнка жидкого кристалла будет прозрачной (рис. 2.51).

ИНТЕРЕСНО Для получения изображений цифр и букв с использованием жидких кристаллов на стеклянные пластины наносят прозрачные и токопроводящие слои оксида олова в виде шрифта, подобно «восьмёркам» на почтовых конвертах. Элементы «восьмёрки» электрически изолированы. Пластины склеивают так, чтобы направления полировки совпадали, токопроводящие элементы «восьмёрок» находились с внутренней стороны и были обращены друг к другу. Зазор между пластинами, составляющий 10—30 мкм, заполняют жидким кристаллом. На прозрачные электроды в нужной комбинации подают напряжение. На участках жидкого кристалла, находящихся под напряжением, разрушается жидкокристаллическая структура. Вследствие сильного рассеяния света эти участки становятся непрозрачными. В результате элементы «восьмёрки», на которые подано напряжение, начинают «светиться», а окружающее их поле и элементы «восьмёрок» без напряжения остаются тёмными из-за прозрачности.

Жидкокристаллические устройства с большим числом элементов и сложной электронной схемой управления служат телевизионными экранами.

Жидкие кристаллы. Оптические свойства жидких кристаллов

1. Что такое жидкие кристаллы? 2. Какими свойствами обладают молекулы веществ, способных существовать в жидкокристаллическом состоянии?

1. Принцип действия приборов, в которых используются жидкие кристаллы. 2. Устройство жидкокристаллических термометров.

ОТВЕТЬТЕ НА ИТОГОВЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ

1. Опишите классический опыт, который позволяет проиллюстрировать распределение молекул по скоростям.

2. Дайте определение понятия «идеальный газ».

3. Сравните три агрегатных состояния вещества. Самостоятельно определите параметры сравнения, которые вы считаете наиболее важными. Ответ оформите в виде таблицы.

4. Сравните реальный газ и его модель. Объясните происхождение коэффициентов в уравнении для описания реального газа.

5. Изобразите диаграмму состояния вещества. Приведите примеры веществ, которые могут переходить из одного состояния в другое, минуя одно из состояний.

6. Укажите разницу между различными термометрическими шкалами.

7. Каким образом можно продемонстрировать связь между микроскопическими параметрами (характеристиками молекулы) и макроскопическими параметрами (характеристиками всей системы)?

1. Воспользуйтесь цифровым микроскопом и понаблюдайте процесс движения броуновской частицы. Для этого растворите в воде немного акварельной краски, а затем на предметное стекло поместите каплю полученной суспензии. С помощью веб-камеры микроскопа понаблюдайте за броуновскими частицами. Подберите такое количество краски в суспензии, чтобы частиц было не очень много. Создайте с помощью веб-камеры небольшой фрагмент фильма о поведении броуновских частиц. Далее воспользуйтесь программой видеоанализа или в ручном режиме сделайте несколько фотографий положения броуновской частицы через равные промежутки времени. Нарисуйте траекторию движения частицы, рассчитайте расстояния между каждыми двумя последовательными положениями частицы и скорости её движения. Перед выполнением задания внимательно прочитайте § 20.

2. Сделайте из проволоки несколько плоских и несколько объёмных каркасов различной формы (например, окружность, прямоугольник, треугольник, параллелепипед, тетраэдр, седло). Опустив в мыльный раствор изготовленный каркас, понаблюдайте за получившейся плёнкой. (Для того чтобы плёнка дольше сохранялась на каркасе, его следует обезжирить, а в мыльный раствор добавить немного глицерина.) Попробуйте объяснить, почему плёнка располагается именно так.

3. Методы получения низких температур. Измерение низких температур. Физические явления при низких температурах. История физики низких температур.

ЕГЭ

А1. На мокрую пористую бумагу, лежащую на дне горизонтального плоского сосуда, закрытого крышкой, капнули каплю концентрированного раствора марганцовки. В таблице представлены результаты измерений диаметра D пятна на бумаге, наблюдаемого через промежуток времени t.

t, ч	0	1	2	4
D, мм	6	10	11,5	13,5

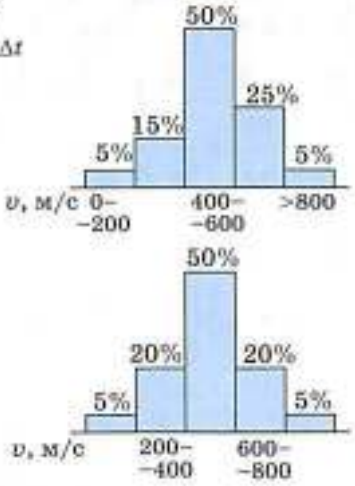
Какое явление стало причиной роста размеров пятна с течением времени?

1) растворение
2) диффузия
3) распад красителя
4) броуновское движение

А2. Броуновским движением является
1) беспорядочное движение мелких пылинок в воздухе
2) беспорядочное движение мошек, роящихся вечером под фонарём
3) проникновение питательных веществ из почвы в корни растений
4) растворение твёрдых веществ в жидкостях

А3. Броуновская частица переместилась за промежуток времени Δt на расстояние Δs. В этот промежуток времени она
1) двигалась прямолинейно с постоянной скоростью $\frac{\Delta s}{\Delta t}$
2) двигалась прямолинейно с постоянным ускорением $\frac{2\Delta s}{\Delta t^2}$
3) гармонически колебалась с амплитудой Δs и периодом Δt
4) двигалась так, что закономерностей в форме её траектории обнаружить не удалось

А4. В опытах по измерению скоростей молекул газа получены следующие диаграммы распределения молекул по скоростям (см. рис.). Как соотносятся средние скорости молекул в 1-м и 2-м опытах?



1) $\upsilon_1 = \upsilon_2$
2) $\upsilon_1 > \upsilon_2$
3) $\upsilon_1 < \upsilon_2$
4) невозможно оценить по приведённым данным

А5. Молярная масса — это
1) масса одной молекулы
2) масса одного атома
3) масса вещества, реагирующего с углеродом массой 12 г
4) масса $6 \cdot 10^{23}$ молекул вещества

С6. Фольгу из золота раскатывают до толщины 0,1 мкм. Плотность золота 19 300 кг/м^3. Оцените, сколько примерно слоёв атомов золота пробивает частица, пролетающая сквозь фольгу.

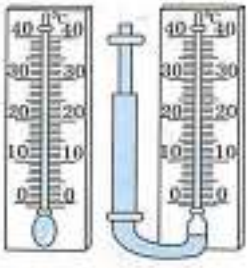
А7. При расширении идеального газа его объём увеличился в 2 раза, а температура уменьшилась в 2 раза. Как изменилось при этом давление газа?
1) увеличилось в 2 раза
2) уменьшилось в 4 раза
3) увеличилось в 4 раза
4) не изменилось

В8. Как изменяются температура, концентрация молекул и плотность газа под поршнем при его изотермическом сжатии?
К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

Физическая величина	Изменение физической величины
А) температура	1) не изменяется
Б) концентрация молекул	2) увеличивается
В) плотность	3) уменьшается

А	Б	В

А9. На рисунке показан прибор для измерения влажности в комнате. Чему равна влажность воздуха в этой комнате?



1) 22/15

2) 15/22

3) для ответа на вопрос необходима таблица зависимости давления насыщенных паров от температуры

4) для ответа на вопрос необходима психрометрическая таблица

А10. В таблице приведена зависимость температуры плавления ряда веществ от их молярной массы.

Вещество	M, кг/моль	$t_{пл}$, °C	Вещество	M, кг/моль	$t_{пл}$, °C
Литий	7	180	Кремний	28	1410
Бериллий	9	900	Сера	32	113
Бор	11	2300	Хлор	35,5	−101
Фтор	19	−220	Калий	39,1	64
Неон	20	−248	Кальций	40	839
Натрий	23	98	Скандий	44	1541
Алюминий	27	660	Титан	48	1660

На основании этих данных можно сделать вывод, что для приведённых веществ температура плавления с ростом молярной массы вещества

1) монотонно увеличивается

2) монотонно уменьшается

3) периодически растёт, а затем падает

4) изменяется случайным образом с ростом молярной массы

А11. ρ_1 — плотность вещества в жидком состоянии, ρ_2 — плотность вещества после кристаллизации. Какое соотношение плотностей справедливо?

1) $\frac{\rho_1}{\rho_2} > 1$ 2) $\frac{\rho_1}{\rho_2} < 1$ 3) $\frac{\rho_1}{\rho_2} = 1$ 4) $\frac{\rho_1}{\rho_2}$ зависит от вещества

Глава 3. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

§ 34. Термодинамический метод

Повторите: атом, молекула, идеальный газ, состояние системы.

Термодинамика. Молекулярно-кинетическая теория объясняет свойства тел и явления, происходящие в веществе, исходя из рассмотрения характера движения и взаимодействия частиц — молекул или атомов, и она достигает в этом значительных успехов. Например, давление идеального газа объясняется бомбардировкой стенок сосуда огромным числом молекул, а зависимость его от температуры количественно точно описывается в этой теории, исходя из представления о связи давления со средней кинетической энергией поступательного движения молекул газа.

Однако в ряде случаев методы молекулярной физики оказываются слишком сложными для количественного описания явлений. В частности, для того чтобы методами кинетической теории получить количественную связь между параметрами состояния реального газа, жидкости или твёрдого тела, следует учитывать силы, действующие между частицами вещества. Это в большинстве случаев сделать сложно, а часто вообще невозможно.

Между тем многие соотношения между параметрами состояния вещества можно вывести, ничего не зная о внутреннем «механизме» явлений, обусловливающем эту связь.

ЗАПОМНИТЕ Раздел физики, где изучаются свойства тел, но не рассматривается характер движения и взаимодействия частиц, из которых они состоят, называется **термодинамикой**.

Термодинамика рассматривает свойства тел и явления, происходящие в них, опираясь на некоторые общие законы (начала) термодинамики, являющиеся обобщением огромного числа опытных фактов. Законы термодинамики и молекулярно-кинетическая теория дополняют друг друга, расширяют возможности изучения общих свойств систем, состоящих из большого числа частиц.

ИНТЕРЕСНО Первоначально термодинамика возникла как наука об использовании теплоты для получения работы, т. е. как теоретическая

теплотехника. Её задача состояла в изучении закономерностей создания наиболее экономичных тепловых двигателей. Однако попутно были открыты законы термодинамики, обладающие большой общностью. Эти законы относятся к преобразованиям энергии, её изменениям в различных процессах и к ряду связанных с ней величин. Отсюда понятна общность законов термодинамики — ведь энергетические превращения сопутствуют всем явлениям природы.

Современная термодинамика определяется как учение о наиболее общих свойствах макроскопических физических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и о процессах перехода между этими состояниями.

ЗАПОМНИТЕ Состояние системы тел, в которой в разных точках параметры состояния или хотя бы один из них, например температура, имеют различные значения, называют **неравновесным**.

В этом случае мы не можем приписать всей системе какие-то определённые значения параметров, например какую-то определённую температуру. Если такую систему изолировать и предоставить самой себе, то произойдёт процесс выравнивания температуры, после чего процесс теплообмена прекратится — наступит термодинамическое равновесие.

ЗАПОМНИТЕ **Равновесным состоянием** называется такое состояние, при котором параметры системы имеют определённые значения, одинаковые для всех её частей.

Переход системы из одного равновесного состояния в другое равновесное состояние представляет собой последовательность неравновесных состояний, т. е. является неравновесным. Однако если такой переход происходит очень медленно, то параметры состояния в разных точках системы мало будут отличаться друг от друга.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Бесконечно медленный процесс состоит из последовательности равновесных состояний, т. е. он является равновесным (квазистатическим) процессом.

Термодинамическая система. В термодинамике часто используется предположение о возможности выделения совокупности тел, не взаимодействующих с другими телами.

ЗАПОМНИТЕ Совокупность физических тел, изолированных от взаимодействия с другими телами, называют **изолированной термодинамической системой**.

Состояние термодинамической системы полностью описывается некоторым числом независимых физических параметров.

Внутренняя энергия. Одним из важнейших параметров термодинамической системы является её внутренняя энергия.

ЗАПОМНИТЕ **Внутренней энергией** системы называют ту часть её полной энергии, которая определяется собственными параметрами этой системы.

Внутренняя энергия тела складывается из кинетической энергии хаотичного теплового движения составляющих его частиц (атомов или молекул) и потенциальной энергии их взаимодействия. Кинетическая и потенциальная энергии тела как целого во внутреннюю энергию не входят.

Вычислить внутреннюю энергию путём подсчётов энергии всех взаимодействующих между собой многих миллиардов частиц нет никакой практической возможности, так как законы зависимости сил взаимодействия атомов и молекул от расстояния между ними сложны, а взаимное расположение частиц в результате теплового движения непрерывно изменяется. Также беспорядочно меняется и кинетическая энергия отдельных частиц.

Простое решение эта задача имеет для случая идеального газа.

Внутренняя энергия идеального газа. Внутренняя энергия идеального газа представляет собой сумму только кинетических энергий теплового движения его частиц, поскольку взаимодействием частиц идеального газа можно пренебречь. Наиболее просто можно вычислить внутреннюю энергию идеального одноатомного газа (гелия, неона, аргона и др.), так как его молекулы (атомы) совершают только поступательное движение.

Средняя кинетическая энергия молекул такого газа равна $\frac{3}{2}kT$. Поэтому внутренняя энергия газа, состоящего из N молекул, равна $U = \frac{3}{2}NkT$. Так как $N = \frac{m}{M}N_A$, то

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

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Внутренняя энергия идеального газа зависит только от одного параметра — его абсолютной температуры: $U = f(T)$.

Два способа изменения внутренней энергии. Внутренняя энергия изолированной термодинамической системы может изменяться двумя способами: при совершении работы и при теплообмене (теплопередаче). Напомним, что

ЗАПОМНИТЕ **количеством теплоты** называется энергия, передаваемая путём теплообмена.

Количество теплоты, необходимой для нагревания тела, определяется по формуле

$$Q = cm\Delta T,$$

где c — удельная теплоёмкость вещества; $\Delta T = T_2 - T_1$ — изменение температуры. Изменить внутреннюю энергию тела можно, приведя его в соприкосновение с другим телом, имеющим более высокую или низкую температуру. При этом горячее тело передаёт часть своей энергии более холодному, т. е. часть энергии беспорядочного движения частиц горячего тела переходит в энергию беспорядочного движения частиц более холодного тела. В результате температуры тел выравниваются. Но так как при этом не перемещаются ни сами тела, ни их части, то работа при этом не совершается.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Как известно, работа — это макроскопический процесс; она совершается только при упорядоченном перемещении тела, когда все его частицы движутся вместе в одном направлении. Внутренняя же энергия связана с беспорядочным тепловым движением частиц вещества. Следовательно, для того чтобы за счёт внутренней энергии тела можно было совершить работу, необходимо каким-либо способом хотя бы частично преобразовать хаотичное движение его частиц в упорядоченное движение.

Для этого можно использовать газ, находящийся в цилиндре с поршнем. Если давление газа под поршнем больше давления окружающего воздуха, то за счёт энергии беспорядочного движения молекул газа произойдёт перемещение поршня в цилиндре. Газ расширится, его объём увеличится, и при этом сила, с которой газ действует на поршень, совершит положительную работу (направления силы и перемещения совпадают). Таким образом,

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ сила давления при расширении газа совершает работу за счёт его внутренней энергии.

Термодинамический процесс. Равновесное и неравновесное состояние. Изолированная термодинамическая система. Количество теплоты

1. Какими способами можно изменить внутреннюю энергию тела? 2. Что такое количество теплоты? 3. Как рассчитать количество теплоты, отдаваемой или получаемой телом при изменении его температуры? 4. При помощи какого простейшего устройства можно преобразовать энергию хаотичного движения молекул в механическую энергию? 5. Приведите примеры процессов, при которых механическая энергия превращается во внутреннюю. 6. Из чего складывается внутренняя энергия идеального газа?

ЗАДАЧА. Чему равна внутренняя энергия гелия, взятого в количестве 12 моль, при температуре 27 °С?

Решение. Внутренняя энергия одноатомного газа определяется по формуле $U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}RT$, где $\frac{m}{M} = \nu$ — число молей вещества. Значит, $U = \frac{3}{2}\nu RT$. Так как $T = 273 + t = 300$ К, то $U = \frac{3}{2} \cdot 12 \cdot 8{,}31 \cdot 300$ Дж $= 4{,}48 \cdot 10^3$ Дж $= 4{,}48$ кДж.

РЕШИТЕ 34.1. Температура аргона, масса которого 20 г, повысилась на 10 К. Чему равно изменение его внутренней энергии?

34.2. Чему равно изменение внутренней энергии идеального одноатомного газа, взятого в количестве 10 моль, при его охлаждении на 20 К?

34.3. Одноатомный идеальный газ, взятый в количестве 2 моль, при температуре 200 К изохорно перевели в состояние, в котором давление в два раза больше первоначального, а затем изобарно — в состояние, в котором объём в два раза больше первоначального. Определите изменение внутренней энергии газа. Начертите график этого процесса в координатах p, V.

34.4. Азот находится в закрытом сосуде при температуре 128 К и давлении 1400 Па. Газ нагревают до температуры 10 000 К, при которой молекулы азота практически полностью распадаются на атомы. Определите давление газа в сосуде при этих условиях. Какой внутренней энергией обладает разогретый азот объёмом 1 л?

§ 35. Первый закон термодинамики

Повторите: закон сохранения энергии.

Закон сохранения энергии. Приведём такой опыт. Резким движением поршня сожмём воздух в шприце, предварительно зажав пальцем отверстие. После прекращения действия внешней силы сжатый воздух расширится и вытолкнет поршень из шприца.

Этот опыт показывает, что возможны взаимные превращения различных видов энергии: сначала механическая энергия превращается во внутреннюю энергию сжатого газа, затем внутренняя энергия газа превращается в механическую энергию поступательного движения поршня.

Анализ результатов наблюдений природных явлений и опытов, выполненных к середине XIX в., привёл немецких учёных Ю. Майера (1814—1878) и Г. Гельмгольца (1821—1894), английского учёного Дж. Джоуля (1818—1889) к выводу о существовании *закона сохранения энергии*.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ При любых взаимодействиях тел энергия не исчезает бесследно и не возникает из ничего. Энергия только передаётся от одного тела к другому или превращается из одной формы в другую.

Внутренняя энергия U системы, изолированной от любых взаимодействий с внешней средой, не изменяется при любых взаимодействиях внутри системы. Следовательно, для изолированной системы справедливо соотношение

$$U = \text{const}, \text{ или } \Delta U = 0.$$

Первый закон термодинамики. Рассмотрим примеры применения закона сохранения энергии к процессам, в которых происходит превращение механической энергии во внутреннюю энергию тел или внутренней энергии тел в механическую.

При ударе молотка по свинцовой пластине изменяются кинетическая энергия молотка и внутренняя энергия свинцовой пластины. Кинетическая энергия молотка убывает, внутренняя энергия пластины возрастает. В соответствии с законом сохранения энергии в изолированной системе молоток—пластина полная энергия системы тел при их взаимодействии не изменилась. Следовательно, внутренняя энергия пластины увеличилась настолько, насколько уменьшилась кинетическая энергия молотка: $\Delta U_{пл} = (-E_k)_{мол}$.

Мерой изменения кинетической энергии молотка является работа сил, действующих на него со стороны пластины: $A = (E_k)_{мол}$.

Молоток и пластина действуют друг на друга равными по модулю и противоположно направленными силами (третий закон Ньютона). Работа этих сил $A' = -A = -(\Delta E_k)_{мол}$.

Следовательно, изменение внутренней энергии свинцовой пластины равно работе внешних сил: $\Delta U_{пл} = A'$.

Если внутренняя энергия тела изменяется в результате теплообмена с другими телами, то изменение внутренней энергии равно количеству теплоты Q, переданной телу: $\Delta U = Q$.

В общем случае внутренняя энергия системы может изменяться как за счёт работы внешних сил, так и за счёт теплообмена с окружающими телами. Это обобщение закона сохранения и превращения энергии для термодинамической системы называется *первым законом термодинамики*.

ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

В термодинамической системе изменение внутренней энергии ΔU равно сумме количества переданной теплоты Q и работы A' внешних сил:

$$\Delta U = Q + A'. \qquad (35.1)$$

Смысл первого закона термодинамики заключается в том, что внутренняя энергия тела, взаимодействующего с другими телами, изменяется за счёт двух процессов — теплообмена и работы внешних сил.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Любое увеличение внутренней энергии тела обязательно сопровождается уменьшением в равной количественной мере энергии взаимодействующих с ним тел. Работа A' внешних сил является мерой энергии, переданной телу при механическом взаимодействии его с другими телами; количество теплоты Q является мерой энергии, переданной от других тел путём теплопередачи.

Вместо работы A', совершаемой внешними силами над термодинамической системой, часто удобнее рассматривать работу A, совершаемую термодинамической системой над внешними телами. Так как эти работы равны по модулю, но противоположны по знаку: $A = -A'$, то первый закон термодинамики можно записать так:

$$\Delta U = Q - A. \qquad (35.2)$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Изменение внутренней энергии термодинамической системы равно разности полученного количества теплоты Q и работы A, совершённой системой.

При рассмотрении процессов в газах уравнение (35.2) следует применять в тех случаях, когда газ расширяется и совершает положительную работу над внешними телами. Примером такого процесса может служить нагревание газа в цилиндре, в результате чего газ расширяется и совершает работу.

Из первого закона термодинамики следует, что при передаче телу количества теплоты его внутренняя энергия может увеличиться, уменьшиться или остаться неизменной в зависимости от того, какую работу совершает система против внешних сил. При одном и том же изменении внутренней энергии тела от него можно получить разное количество теплоты в зависимости от той работы, которую совершает тело. Поэтому такое понятие, как «запас количества теплоты в теле», не имеет смысла.

ИНТЕРЕСНО **Вечный двигатель.** Современная жизнь человека невозможна без использования самых разнообразных машин. С помощью машин человек обрабатывает землю, собирает урожай, добывает нефть, уголь, руду, строит дома, дороги, совершает поездки по земле, воздуху, воде.

Основным общим свойством всех этих машин является их способность совершать работу. Многие изобретатели в прошлом пытались построить машину, способную совершать полезную работу без потребления энергии извне и без каких-либо изменений внутри самой машины. Машину с такими свойствами называют *вечным двигателем первого рода*. Все эти попытки окончились неудачей. Невозможность создания вечного двигателя первого рода подтверждает тем самым первый закон термодинамики. Согласно первому закону термодинамики (35.2) работа A, совершённая машиной, равна $A = Q - \Delta U$.

Любая машина может совершать работу над внешними телами только за счёт получения извне некоторого количества теплоты или уменьшения её внутренней энергии.

Первый закон термодинамики. Вечный двигатель первого рода

1. В чём заключается смысл закона сохранения энергии? 2. К каким системам применим закон сохранения энергии? 3. Как формулируется первый закон термодинамики? 4. К каким системам применим первый закон термодинамики? 5. Что является доказательством справедливости первого закона термодинамики?

ЗАДАЧА. Некоторой термодинамической системе передано количество теплоты, равное 100 Дж. Как изменилась внутренняя энергия системы, если при этом система совершила работу 300 Дж?

Решение. Применим к термодинамической системе первый закон термодинамики (35.2): $\Delta U = Q - A$, где A — работа, совершённая системой. Тогда

$$\Delta U = 100 \text{ Дж} - 300 \text{ Дж} = -200 \text{ Дж}.$$

Внутренняя энергия системы уменьшилась на 200 Дж.

РЕШИТЕ

35.1. Термодинамической системе передано количество теплоты, равное 2000 Дж, и над ней совершена работа 500 Дж. Определите изменение внутренней энергии этой системы.

35.2. В результате совершения работы внешними силами и теплопередачи внутренняя энергия термодинамической системы увеличилась на 200 Дж. Какое количество теплоты было передано термодинамической системе, если при этом внешние силы совершили работу 50 Дж?

35.3. Какое количество теплоты нужно передать идеальному газу, находящемуся в цилиндре под поршнем, для того чтобы внутренняя энергия газа увеличилась на 100 Дж и при этом газ совершил работу 200 Дж?

35.4. Определите работу внешних сил над термодинамической системой, если изменение внутренней энергии системы составило 500 Дж при передаче ей количества теплоты 400 Дж.

35.5. В результате получения количества теплоты 800 Дж воздух в цилиндре расширился и совершил работу 200 Дж. Как изменилась при этом внутренняя энергия воздуха?

35.6. Какую работу совершил газ при передаче ему количества теплоты 10^4 Дж, если его внутренняя энергия при этом увеличилась на $2 \cdot 10^4$ Дж?

Возьмите медицинский шприц, снимите с него иглу. Отверстие заткните пальцем. Проведите опыт, описанный на с. 181 учебника.

Исследования Р. Майера и обстоятельства их проведения.

§ 36. Работа при изменении объёма газа

Повторите: работа.

Сила давления газа совершает работу при его расширении, т. е. при изменении объёма. Если газ, расширяясь при постоянном давлении, сместил поршень на расстояние Δl (рис. 3.1, *а*), то работа, совершённая при этом силой давления F, будет равна $A = F\Delta l$, или $A = pS\Delta l$, где S — площадь поверхности поршня; p — давление газа. Из рисунка видно, что произведение $S\Delta l$ равно изменению объёма газа от его первоначального значения V_1 до конечного значения V_2, т. е. $S\Delta l = V_2 - V_1 = \Delta V$, следовательно,

$$A = p(V_2 - V_1), \text{ или } A = p\Delta V. \qquad (36.1)$$

Работа расширения газа в изобарном процессе равна произведению давления газа на изменение его объёма. Эта работа положительна при расширении газа, поскольку сила давления газа и перемещение поршня направлены одинаково. Если же газ сжимается (рис. 3.1, *б*), то работа силы, с которой газ действует на поршень, отрицательна (так как $\Delta V < 0$), а работа внешней силы, сжимающей газ, будет при этом положительной: $A' = -A$, т. е. $A' > 0$.

Формула (36.1) относится к случаю, когда давление газа при его расширении или сжатии остаётся постоянным. График этого процесса (в координатных осях p—V) изображён на рисунке 3.2 отрезком AB, параллельным оси абсцисс. Из формулы (36.1) следует, что работа при изобарном расширении численно равна площади фигуры (в выбранном масштабе), закрашенной на рисунке 3.2.

При изменении объёма газа часто изменяется и его давление. Как в этом случае найти работу? Для вычисления работы воспользуемся графическим методом. Допустим, что газ расширяется и при этом его давление изменяется, например уменьшается (рис. 3.3). Выделим на кривой небольшие участки, соответствующие малому изменению объёма ΔV, и из концов каждого участка опустим перпендикуляры на ось объёмов. Если ΔV достаточно мало, то получившиеся полоски (одна из них на рисунке закрашена) могут считаться прямоугольниками. Площадь каждого из них численно равна произведению давления p, соответствующего выбранному участку (одна сторона прямоугольника), на изменение объёма ΔV (другая его сторона). Но произведение pV равно работе при малом изменении объёма ΔV. Из таких малых прямоугольников складывается вся площадь под графиком зависимости давления от объёма. Значит, площадь под кривой и выражает в выбранном на графике масштабе

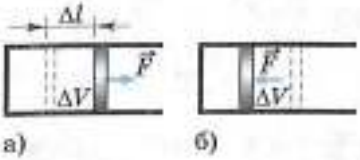


Рис. 3.1

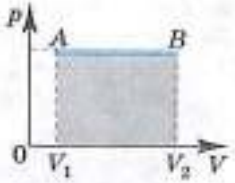


Рис. 3.2

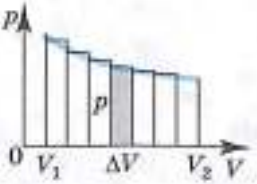


Рис. 3.3

работу силы давления газа при его расширении от объёма V_1 до объёма V_2 (рис. 3.4). Если газ сжимать вдоль той же кривой, то работа газа по-прежнему будет определяться площадью фигуры под кривой, но знак её будет отрицательным (рис. 3.5).

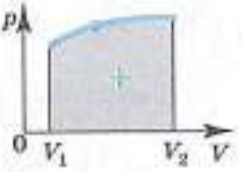


Рис. 3.4

Работа при циклических процессах.

ЗАПОМНИТЕ Процессы изменения состояния газа, в результате которых газ возвращается в исходное состояние, называют **круговыми** или **циклическими**.



Рис. 3.5

При возвращении газа в исходное состояние его давление, объём и температура принимают начальные значения. В консервативных системах работа силы по замкнутой траектории равна нулю. Как обстоит дело с работой при циклических процессах?

Рассмотрим диаграмму кругового процесса, представленную на рисунке 3.6. Идеальный газ сначала расширяется из состояния B в состояние D через состояние C. При расширении он совершает положительную работу, пропорциональную площади фигуры под кривой BCD. При сжатии газа из состояния D в состояние B через состояние E совершается положительная работа внешними силами, а работа газа отрицательна. Она пропорциональна площади фигуры под кривой DEB. Полная работа газа за цикл равна сумме работ при расширении и сжатии газа. Так как работа газа при сжатии отрицательна, полная работа за цикл пропорциональна разности площадей фигур под кривыми BCD и DEB, т. е. пропорциональна площади фигуры $BCDEB$, ограниченной диаграммой кругового процесса в координатных осях $p—V$.

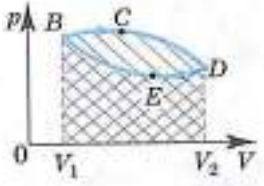


Рис. 3.6

При осуществлении кругового процесса в направлении $BCDEB$ полная работа газа за цикл положительна, так как при расширении газ совершает бóльшую работу, чем затрачивается на его сжатие. Круговые процессы такого типа, в которых расширение газа происходит при более высокой температуре, чем сжатие, используются в тепловых двигателях. Процесс расширения в тепловых двигателях происходит в результате нагревания газа, следовательно, работа совершается за счёт количества теплоты, получаемой газом от нагревателя.

Если круговой процесс осуществляется в обратном направлении $BEDCB$, то работа газа при расширении меньше работы, которую нужно совершить для сжатия газа и возвращения его в исходное состояние. Так как работа внешних сил при сжатии газа больше работы при расширении, полная работа газа за цикл отрицательна. Работа при расширении совершается за счёт уменьшения внутренней энергии газа, его температура при этом понижается, и он отдаёт некоторое количество теплоты окружающей среде. Поэтому круговые процессы, в которых расширение газа происходит при более низких температурах, чем сжатие, используются в холодильных машинах.

Работа при изменении объёма. Циклический процесс

1. Как определить работу, совершаемую газом при изобарном расширении? 2. Как можно сравнить работу, совершённую газом в различных процессах? 3. Почему работа газа при его сжатии отрицательна? 4. Почему работа газа в круговом процессе не равна нулю? 5. При каком условии работа газа в круговом процессе положительна? отрицательна? 6. В каких машинах используются круговые процессы с положительной работой газа за цикл? 7. В каких машинах используются круговые процессы с отрицательной работой газа за цикл? 8. Совершается ли работа при изохорном нагревании газа? Передаётся ли при этом газу некоторое количество теплоты?

ЗАДАЧА. Вычислите работу, совершаемую идеальным газом, взятым в количестве 1 моль, при изобарном нагревании на 1 К.

Решение. При изобарном нагревании идеального газа работа, совершаемая газом, $A = p\Delta V$.

Так как в условии задачи не даны значения давления газа и изменения его объёма, выразим эти величины через известное изменение температуры газа. Для этого воспользуемся уравнением состояния идеального газа:

$$pV_1 = \nu RT_1, \quad pV_2 = \nu RT_2.$$

Из этих уравнений получаем $p(V_2 - V_1) = \nu R(T_2 - T_1)$, $p\Delta V = \nu R\Delta T$.

Отсюда для работы газа при изобарном нагревании будем иметь

$$A = \nu R\Delta T = 1 \cdot 8{,}31 \cdot 1\ (\text{Дж}) = 8{,}31\ \text{Дж}.$$

Таким образом, молярная газовая постоянная R численно равна работе, совершаемой идеальным газом, взятым в количестве 1 моль, при изобарном нагревании на 1 К.

РЕШИТЕ

36.1. С помощью поршня сжимают идеальный газ, взятый в количестве 1 моль, и одновременно охлаждают, так что давление остаётся постоянным. Чему равна работа, совершённая внешней силой при сжатии, если начальные значения объёма и температуры равны 20 дм^3 и 310 К, а конечный объём газа равен 5 дм^3?

36.2. До какой температуры при постоянном давлении надо нагреть воздух массой 2 кг, взятый при температуре 40 °С, чтобы при расширении он совершил работу 5 кДж? Молярную массу воздуха примите равной 0,029 кг/моль.

36.3. Гелий массой 40 г в изобарном процессе совершил работу 8 кДж. Определите изменение температуры гелия в этом процессе. Молярная масса гелия равна $4 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

36.4. Определите работу, совершённую при изобарном расширении азота массой 56 г, если его начальная температура была 0 °С, а объём увеличился в три раза. Молярная масса азота $2{,}8 \cdot 10^{-2}$ кг/моль.

Проведите опыт со шприцем, описанный в предыдущем параграфе. Рассчитайте работу, совершённую вами при изменении объёма газа.

Позвольте поршню шприца свободно перемещаться. Рассчитайте работу, которую совершит поршень.

Сравните полученные значения работы. Объясните, почему они различаются.

Примеры циклических процессов. Устройства, в которых они используются.

§ 37. Применение первого закона термодинамики к различным процессам

Повторите: изотермический, изохорный, изобарный процессы.

Используя первый закон термодинамики, рассмотрим различные процессы в газах, сопровождающиеся изменениями внутренней энергии. Начнём с процессов в идеальном газе.

Изотермический процесс. В идеальном газе внутренняя энергия однозначно определяется абсолютной температурой. При изотермическом расширении или сжатии газа его температура не изменяется. Изменение внутренней энергии идеального газа в изотермическом процессе равно нулю: ΔU_T[1] = 0. На основании первого закона термодинамики (35.2) при изотермическом расширении идеального газа переданное количество теплоты Q_T равно работе A_T, совершённой газом:

$$Q_T = A_T.$$

При изотермическом сжатии идеального газа в соответствии с первым законом термодинамики (35.1) работа внешних сил A' равна переданному количеству теплоты Q_T, взятому с противоположным знаком:

$$A'_T = -Q_T.$$

Поскольку работа внешних сил при сжатии газа положительна, то количество теплоты Q_T, переданной газу, имеет отрицательный знак. Это означает, что

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ при изотермическом сжатии газа происходит теплопередача от газа к окружающим телам.

Изохорный процесс. При изохорном процессе работа газа (и внешних сил над газом) равна нулю, поэтому изменение внутренней энергии ΔU_V идеального газа равно полученному количеству теплоты Q_V. Итак,

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ при изохорном процессе $A = -A' = 0, \quad \Delta U_V = Q_V$.

Изобарный процесс. Изобарное расширение идеального газа происходит при передаче ему количества теплоты Q_p. В результате нагревания газа происходит увеличение его внутренней энергии и совершается работа по расширению:

$$Q_p = \Delta U + A = \Delta U + p\Delta V. \qquad (37.1)$$

Для изобарного сжатия газа необходимо совершить работу A' внешним силам. Для того чтобы давление газа при уменьшении объёма оставалось постоянным, газ нужно охлаждать, т. е. он должен отдать окружающим телам некоторое количество теплоты. Понижение температуры газа при изобарном сжатии свидетельствует об уменьшении его внутренней энергии.

---

[1] В термодинамике принято обозначать индексом внизу тот параметр, который в данном процессе не меняется. Следовательно, ΔU_T означает, что изменение внутренней энергии рассматривается при T = const.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Количество теплоты Q_p, отдаваемой окружающим телам при изобарном сжатии газа, больше работы внешних сил, так как изменение внутренней энергии ΔU имеет отрицательный знак: $\Delta U = A' - Q_p$, $Q_p = A' - \Delta U$.

Адиабатный процесс. В природе и технике часто происходят процессы, близкие к адиабатным.

ЗАПОМНИТЕ **Адиабатным процессом** называется процесс изменения объёма и давления газа при отсутствии теплообмена с окружающими телами, т. е. при условии $Q = 0$.



Рис. 3.7

Отсутствие теплообмена с окружающей средой может быть обеспечено хорошей теплоизоляцией газа. Быстрые процессы расширения или сжатия газа могут быть близкими к адиабатным и при отсутствии теплоизоляции, если время, за которое происходит изменение объёма газа, значительно меньше времени, необходимого для установления теплового равновесия газа с окружающими телами.

Примерами адиабатных процессов могут служить процессы сжатия воздуха в воздушном огниве (рис. 3.7), воздуха в цилиндре двигателя внутреннего сгорания. В соответствии с первым законом термодинамики при адиабатном сжатии изменение внутренней энергии газа равно работе внешних сил:

$$\Delta U = A'. \qquad (37.2)$$

Так как работа внешних сил при сжатии газа положительна, внутренняя энергия газа увеличивается, его температура повышается.

При адиабатном расширении газ совершает работу A за счёт уменьшения внутренней энергии:

$$\Delta U = -A. \qquad (37.3)$$

Поэтому температура газа при адиабатном расширении понижается.

ИНТЕРЕСНО



Рис. 3.8

Понижение температуры газа при адиабатном расширении можно обнаружить в опыте с вылетом пробки из бутылки, содержащей насыщенный водяной пар. При накачивании в бутылку с помощью насоса воздуха пробка вылетает, и в бутылке образуется туман (рис. 3.8). Работа A по выталкиванию пробки совершается газом за счёт уменьшения его внутренней энергии, так как расширение газа происходит за очень короткое время и теплообмен с окружающей средой не успевает произойти. Образование капель тумана из водяного пара доказывает, что при адиабатном расширении воздуха его температура понизилась и в данном опыте стала ниже точки росы.

Поскольку при адиабатном сжатии температура газа повышается, давление газа с уменьшением объёма растёт быстрее, чем при изотермическом процессе. Понижение температуры газа при адиабатном расширении приводит

к тому, что давление газа уменьшается быстрее, чем при изотермическом процессе. График адиабатного процесса в координатных осях p—V представлен на рисунке 3.9. На том же рисунке для сравнения изображён график изотермического процесса.



Рис. 3.9

Мы рассмотрели различные процессы расширения газа, при которых совершается работа. Однако только при адиабатном и изотермическом процессах исключён контакт газа с телами иной температуры — при адиабатном процессе газ теплоизолирован, а при изотермическом он в процессе расширения соприкасается с телом той же температуры (с термостатом). Следовательно, именно в этих процессах исключён переход внутренней энергии газа во внутреннюю энергию других тел, при котором работа не совершается. Поэтому в этих двух процессах изменение внутренней энергии газа или термостата может быть полностью использовано для совершения работы.

Образование облаков. Примером адиабатного процесса в природе является процесс, происходящий в земной атмосфере в летнее время. В летний день земная поверхность, поглощающая бо́льшую часть падающего на неё солнечного излучения, имеет более высокую температуру, чем прозрачный атмосферный воздух. Слой воздуха, находящийся у поверхности Земли, нагревается сильнее, чем слой воздуха, расположенный над ним, так как, кроме излучения Солнца, он подогревается ещё снизу земной поверхностью.

Поверхность Земли неоднородна. На ней имеются холмы и долины, леса и степи, моря и горы, поэтому нагревание земной поверхности и прилегающего к ней слоя воздуха в различных местах оказывается неодинаковым. Воздух над участком поверхности Земли, имеющим повышенную температуру по сравнению с соседними участками, в результате нагревания при постоянном давлении расширяется. Понижение плотности воздуха при расширении приводит к тому, что он «всплывает» вверх, а его место занимает более плотный и холодный воздух (рис. 3.10).


Рис. 3.10

Однако на этом процесс не останавливается. Подъём тёплого воздуха в более высокие слои атмосферы сопровождается его дальнейшим расширением, так как по мере удаления от поверхности Земли атмосферное давление уменьшается. Расширение воздуха происходит адиабатно и поэтому сопровождается его охлаждением. Для сухого воздуха подъём на 100 м по вертикали приводит к его охлаждению на 1 °C. Очевидно, что подъём нагретого воздуха будет продолжаться до тех пор, пока его температура в результате адиабатного охлаждения не сравняется с температурой воздуха на достигнутой высоте (рис. 3.11).

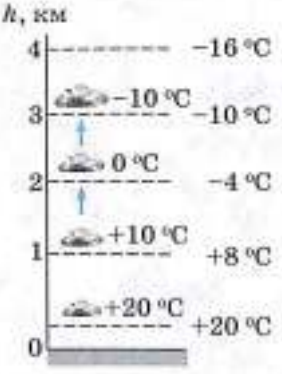


Рис. 3.11

Водяной пар, содержащийся в воздухе, при подъёме и охлаждении на некоторой высоте из ненасыщенного становится пересыщенным, при этом происходит конденсация пара и возникает облако, состоящее из мельчайших капель воды. Высота нижней границы облака определяется условием охлаждения поднимающегося воздуха до точки росы.

Конденсация водяного пара в облаке сопровождается выделением тепла, поэтому воздух в облаке охлаждается менее интенсивно, чем вне его. Процесс дальнейшего его расширения и подъёма продолжается. Облака могут иметь протяжённость по вертикали свыше 10 км. Их вершины даже в самый жаркий летний день находятся в слоях воздуха с температурой ниже 0 °С и состоят не из водяных капель, а из кристаллов льда.

Выяснив механизм образования облаков, поставим вопрос: почему они не падают на Землю? Ответить на него несложно. Как показали экспериментальные исследования структуры облаков, размеры водяных капель в них лежат в пределах от 2 до 70 мкм. Капли таких малых размеров падают в воздухе с очень малой скоростью. Например, скорость падения капли радиусом 10 мкм составляет всего 1 $\frac{\text{см}}{\text{с}}$. Эффект уменьшения скорости падения капли с убыванием её радиуса объясняется тем, что сила тяжести, действующая на каплю, пропорциональна её объёму, т. е. кубу радиуса:

$$F_т \sim V \sim r^3,$$

а сила сопротивления воздуха пропорциональна скорости движения капли и площади её поперечного сечения, т. е. квадрату её радиуса:

$$F_с \sim vS \sim vr^2.$$

С уменьшением радиуса капли сила тяжести убывает быстрее, чем сила сопротивления воздуха, и эти силы уравновешиваются при всё меньших скоростях движения.

Осадки. Если процесс конденсации пара в облаке идёт более интенсивно, чем процесс испарения капель воды на поверхности облака, из облака могут выпадать дождь, снег или град.

Образование осадков в облаке происходит примерно следующим образом. Под действием восходящего воздушного потока водяные капли в результате конденсации пара увеличиваются в размерах. Этот процесс продолжается до тех пор, пока размер капли не станет таким, что скорость её падения превысит скорость подъёма восходящего потока воздуха в облаке. Капли, падающие вниз, встречают на своём пути более мелкие капли, поднимающиеся вверх, сливаются с ними, укрупняются. Процесс продолжается до тех пор, пока капли не выпадут из облака в виде дождя.

Особенно эффективно происходит образование осадков, если вершина облака состоит из кристалликов льда. При достижении критических размеров кристаллики льда начинают падать. Процесс конденсации пара на их поверхности в нижних слоях облака протекает более интенсивно, чем на поверхности капель. В результате из облака выпадает снег, а в некоторых случаях град.

Адиабатный процесс

1. Как изменяется внутренняя энергия идеального газа при изотермическом процессе? 2. Какая связь между изменением внутренней энергии идеального газа и переданным ему количеством теплоты при изохорном процессе? 3. Как изменяется внутренняя энергия идеального газа при изобарном сжатии? 4. Какой процесс изменения состояния газа называется адиабатным? Как этот процесс может быть осуществлён? 5. Каким способом может быть осуществлён изотермический процесс? Нужен ли при этом теплообмен газа с окружающей средой? 6. Как меняется температура идеального газа при адиабатном процессе?

РЕШИТЕ

37.1. Идеальный газ с начальным давлением p_1, занимающий объём V_1, расширяется до объёма V_2. В каком случае газ совершает бо́льшую работу — при изотермическом или адиабатном расширении?

37.2. Поезд массой $2 \cdot 10^3$ т движется со скоростью 72 км/ч. Какое количество теплоты выделится в его тормозных устройствах в процессе торможения поезда до остановки?

37.3. Одноатомный газ в количестве 2 моль находится в цилиндре с подвижным поршнем под атмосферным давлением. В процессе его нагревания температура повысилась от 20 до 70 °С. Какое количество теплоты было передано газу?

37.4. Газ переходит из состояния B в состояние D один раз в результате процесса BCD, другой раз в результате процесса BED (рис. 3.12). Используя данные рисунка, определите разность количеств теплоты, получаемой телом в ходе обоих процессов.

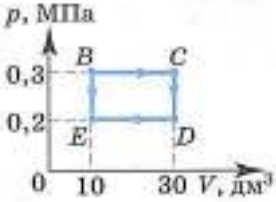


Рис. 3.12

37.5. Путём изобарного процесса гелий массой 8 г перевели в состояние, в котором объём газа в четыре раза больше первоначального. Определите работу, которую совершил гелий при расширении, изменение его внутренней энергии и количество теплоты, сообщённой газу, если его начальная температура 0 °С.

Возьмите бутылку с газированной водой, поместите её в холодильник. Через некоторое время наденьте экспериментальный напиток и резко снимите с бутылки крышку. Внимательно наблюдайте, что при этом произойдёт в области горлышка бутылки.

1. Условия и процесс образования облаков, возникновения осадков.
2. Примеры адиабатных процессов.

§ 38. Теплоёмкость газов и твёрдых тел

Повторите: тепловые явления, количество теплоты.

Количество теплоты и удельная теплоёмкость. Чтобы вычислить изменение внутренней энергии тела в результате теплопередачи, необходимо каким-либо способом измерить количество теплоты, полученной телом. Определение переданного телу количества теплоты основано на измерении температуры. Если работа внешних сил равна нулю ($A' = 0$) и изменение внутренней энергии тела происходит только в результате теплопередачи, то согласно закону термодинамики $\Delta U = Q_V$ (изохорный процесс).

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Изменение внутренней энергии тела в результате передачи ему количества теплоты можно выразить следующим образом:

$$\Delta U = Q_V = c_V m \Delta T,$$

где ΔT — изменение температуры тела; m — масса тела как макроскопическая величина, пропорциональная числу N частиц в нём; c_V — постоянная, называемая *удельной теплоёмкостью вещества при постоянном объёме* (зависит от свойств данного вещества и его состояния).

Из этого выражения следует, что удельная теплоёмкость при постоянном объёме равна отношению изменения внутренней энергии вещества к массе и изменению его температуры:

$$c_V = \frac{Q_V}{m\Delta T} = \frac{\Delta U}{m\Delta T}. \qquad (38.1)$$

Единица удельной теплоёмкости — $1\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Уравнение теплового баланса. Если известна удельная теплоёмкость c_1 одного вещества, то удельную теплоёмкость c_2 любого другого вещества легко определить, приведя в тепловой контакт два тела с известными массами и различными начальными температурами в условиях теплоизоляции.

В результате осуществления теплопередачи от горячего тела к холодному в системе устанавливается тепловое равновесие. Согласно закону сохранения энергии в изолированной системе изменение внутренней энергии одного тела равно по модулю и противоположно по знаку изменению внутренней энергии другого тела, т. е. $\Delta U_1 + \Delta U_2 = 0$.

ЗАПОМНИТЕ Если изменение внутренней энергии системы происходило только путём теплопередачи ($A = 0$), то на основании первого начала термодинамики можно записать:

$$\Delta U_1 = Q_1,\ \Delta U_2 = Q_2,\ Q_1 + Q_2 = 0,$$

в результате получим уравнение

$$c_1 m_1 \Delta T_1 + c_2 m_2 \Delta T_2 = 0,$$

называемое **уравнением теплового баланса**.

Из уравнения теплового баланса можно выразить удельную теплоёмкость c_2 вещества:

$$c_2 = -\frac{c_1 m_1 \Delta T_1}{m_2 \Delta T_2}.$$

Таким образом, зная удельную теплоёмкость c_1 одного вещества, можно определить удельную теплоёмкость любого другого вещества.

ИНТЕРЕСНО Но как определить удельную теплоёмкость c_1 выбранного нами эталонного вещества? Для идеального газа расчёт можно произвести теоретически. Но для любого реального вещества это можно сделать лишь на основе специального эксперимента.

На тело известной массы m произведём механическое воздействие, приводящее к его нагреванию, и измерим изменение его температуры ΔT. Если механическое воздействие на тело производилось без теплообмена с другими телами, т. е. при условии $Q = 0$, то согласно первому началу термодинамики изменение внутренней энергии ΔU тела равно работе внешних сил A' (см. формулу (37.2)).

Такое же изменение внутренней энергии тела можно вызвать изохорным нагреванием:

$$\Delta U = Q_V = c_V m \Delta T.$$

Отсюда для определения удельной теплоёмкости c_V получаем выражение

$$c_V = \frac{Q_V}{m\Delta T} = \frac{A'}{m\Delta T}.$$

Следовательно, для определения удельной теплоёмкости вещества при постоянном объёме нужно измерить работу, совершённую внешними силами, действующими на тело, и наблюдаемое в результате совершения работы изменение температуры тела в условиях отсутствия теплообмена его с другими телами. Такого рода эксперименты были в 1843 г. впервые выполнены Дж. Джоулем.

Теплоёмкость идеального газа при постоянном объёме. Количество теплоты, передаваемой телу при теплопередаче, не определяет однозначно температуру тела, так как внутренняя энергия тела может изменяться и за счёт совершения над ним работы. Поэтому в отличие от такой, например, неизменной характеристики вещества, как молярная масса, удельная теплоёмкость зависит от условий, при которых происходит передача тепла.

Рассмотрим случай передачи тепла идеальному газу при условии неизменности занимаемого им объёма (изохорный процесс).

Условие передачи тепла газу при постоянном объёме выбрано не случайно. Поскольку работа, совершаемая внешними силами над газом при постоянном объёме, равна нулю, то удельную теплоёмкость газа при постоянном объёме можно найти, вычислив изменение внутренней энергии газа массой 1 кг при изменении его температуры на 1 К, используя выражение (38.1).

Внутренняя энергия одноатомного идеального газа равна сумме кинетических энергий теплового (поступательного) движения молекул и может быть

найдена как произведение средней кинетической энергии $\overline{E}$ теплового движения молекулы на число молекул N:

$$U = \overline{E}N = \frac{3}{2}kTN.$$

Изменение внутренней энергии идеального газа при увеличении его температуры на ΔT можно определить из выражения

$$\Delta U = \frac{3}{2}k\Delta TN. \qquad (38.2)$$

Из формул (38.1) и (38.2) получаем

$$c_V = \frac{3k\Delta TN}{2m\Delta T} = \frac{3kN}{2m} = \frac{3kN_A}{2M} = \frac{3R}{2M},$$

где M — молярная масса газа.

Для того чтобы проверить применимость полученного результата к реальным газам, вычислим удельные теплоёмкости при постоянном объёме для некоторых газов и сравним их с удельными теплоёмкостями, полученными экспериментально при температурах около 300 К. Результаты вычислений для водорода, гелия, азота, аргона и углекислого газа приведены в первой строке таблицы 3. Во второй строке этой таблицы приведены удельные теплоёмкости тех же газов, полученные экспериментально.

Таблица 3

Формула и наименование	Водород	Гелий	Азот	Аргон	Углекислый газ
$c_V = \frac{3R}{2M}$, Дж/(кг · К)	$6{,}2 \cdot 10^3$	$3{,}1 \cdot 10^3$	$4{,}45 \cdot 10^2$	$3{,}1 \cdot 10^2$	$2{,}8 \cdot 10^2$
$(c_V)_{эксп}$, Дж/(кг · К)	$1{,}01 \cdot 10^4$	$3{,}2 \cdot 10^3$	$7{,}5 \cdot 10^2$	$3{,}2 \cdot 10^2$	$6{,}5 \cdot 10^2$
$c_V = \frac{iR}{2M}$, Дж/(кг · К)	$1{,}04 \cdot 10^4$	$3{,}1 \cdot 10^3$	$7{,}4 \cdot 10^2$	$3{,}1 \cdot 10^2$	$5{,}7 \cdot 10^2$

Сравнение расчётных и экспериментальных значений удельных теплоёмкостей газов при постоянном объёме показывает хорошее их согласие для гелия и аргона. Удельные теплоёмкости водорода, азота и углекислого газа оказываются в действительности значительно большими, чем предсказывает теория, основанная на применении модели одноатомного идеального газа.

Чем же отличаются гелий и аргон от остальных газов? Существенным отличием от водорода, азота и углекислого газа является то, что это инертные газы. Силы взаимодействия между атомами инертных газов настолько малы, что они при нормальных условиях не соединяются в молекулы. Гелий и аргон — одноатомные газы; водород, азот и углекислый газ — молекулярные газы.

Распределение энергии по степеням свободы. Попробуем уточнить теорию. До сих пор при рассмотрении свойств атомов или молекул газа в расчётах

учитывалась лишь их кинетическая энергия поступательного движения, а кинетическая энергия вращательного движения считалась пренебрежимо малой.

Согласие расчётных данных с экспериментальными при вычислении теплоёмкостей одноатомных газов показывает, что для них такое предположение справедливо. Поскольку теплоёмкости многоатомных газов оказываются большими, чем следует из расчётов при учёте только кинетической энергии поступательного движения молекулы, можно предположить, что внутренняя энергия молекулярных газов складывается как из кинетической энергии поступательного движения молекул, так и из кинетической энергии их вращательного движения.

В прямоугольной системе координат состояние молекулы задаётся тремя координатами и тремя проекциями вектора скорости $\vec{v}$ на эти координатные оси: v_x, v_y, v_z (рис. 3.13, *а*).

ЗАПОМНИТЕ **Степенью свободы тела** называется любое независимое движение, которое оно может совершить.

Очевидно, что у материальной точки (одноатомные молекулы) в пространстве есть только три степени свободы.

Так как движение молекул газа совершенно хаотично, квадраты проекций скорости на каждую ось в среднем оказываются одинаковыми:

$$v_x^2 = v_y^2 = v_z^2.$$

Отсюда следует, что и кинетическая энергия поступательного движения, приходящаяся на каждую из трёх степеней свободы движения, в среднем одинакова. Так как средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы равна $\overline{E}_k = \frac{3}{2}kT$, то кинетическая энергия, приходящаяся на одну степень свободы движения, равна $\frac{1}{2}kT$.

Теплоёмкость многоатомных газов. Двухатомная молекула, кроме трёх степеней свободы поступательного движения, обладает ещё и двумя степенями свободы вращательного движения, так как может совершать вращение вокруг двух взаимно перпендикулярных осей (OZ, OY).

Вращением двухатомной молекулы вокруг третьей оси, проходящей через центры атомов, можно пренебречь, так как предположение об отсутствии вращения атомов вокруг своих осей подтверждалось в случае вычисления теплоёмкости одноатомных газов. Итак, у двухатомной молекулы имеется пять степеней свободы (рис. 3.13, *б*). Предполагая, что по-прежнему на одну степень свободы приходится кинети-

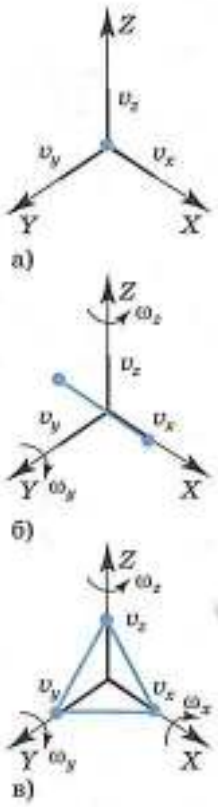


Рис. 3.13

ческая энергия, равная $\frac{1}{2}kT$, мы получаем, что кинетическая энергия двухатомной молекулы равна:

$$\overline{E}_k = \overline{E}_{\text{пост}} + \overline{E}_{\text{вр}} = 3\frac{1}{2}kT + 2\frac{1}{2}kT = \frac{5}{2}kT.$$

Молекулы, состоящие более чем из двух атомов, обладают тремя степенями свободы вращательного движения и тремя степенями свободы для поступательного движения (рис. 3.13, *в*). Для газа, молекулы которого обладают числом степеней свободы, равным i, кинетическая энергия $\overline{E}_k = \frac{i}{2}kT$. Тогда для удельной теплоёмкости при постоянном объёме мы получим следующее выражение:

$$c_V = \frac{i}{2}\frac{R}{M}. \qquad (38.3)$$

Используя его, вычислим удельные теплоёмкости двухатомных водорода и азота и трёхатомного углекислого газа. Результаты вычислений приведены в третьей строке таблицы 3.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Хорошее согласие теоретических и экспериментальных значений удельных теплоёмкостей многоатомных газов доказывает справедливость сделанного предположения о равном распределении энергии по степеням свободы движения. Такое распределение энергии по степеням свободы доказывается в классической молекулярно-кинетической теории и называется *законом равнораспределения*.

Теплоёмкость идеального газа при постоянном давлении. Используя первый закон термодинамики для изобарного процесса (см. формулу (37.1)), получим $c_p = \frac{Q_p}{m\Delta T} = \frac{\Delta U + A}{m\Delta T} = \frac{\Delta U}{m\Delta T} + \frac{A}{m\Delta T} = c_V + \frac{A}{m\Delta T}$.

Работу идеального газа при изобарном расширении можно определить из выражения $A = p\Delta V = \frac{m}{M}R\Delta T$.

Отсюда для удельной теплоёмкости идеального газа при постоянном давлении получаем

$$c_p = c_V + \frac{R}{M}. \qquad (38.4)$$

ЗАПОМНИТЕ Теплоёмкость вещества, взятого в количестве 1 моль, называется **молярной теплоёмкостью** C:

$$C = Mc.$$

Следовательно, молярные теплоёмкости $C_p = c_pM$ и $C_V = c_VM$ связаны уравнением

$$C_p = C_V + R.$$

Это уравнение в 1845 г. получил Ю. Майер.

Работа при адиабатном процессе. Работа идеального газа на основании первого закона термодинамики при адиабатном расширении равна изменению его внутренней энергии, взятому с противоположным знаком (см. формулу (37.3)):

$$A = -\Delta U = mc_V(T_1 - T_2).$$

Для идеального газа, взятого в количестве 1 моль, работа равна:

$$A = C_V(T_1 - T_2). \qquad (38.5)$$

Из уравнения состояния идеального газа (в количестве 1 моль) выразим температуру:

$$T = \frac{pV}{R}, \text{ или } T = \frac{pV}{(C_p - C_V)}. \qquad (38.6)$$

Подставив формулу (38.6) в формулу (38.5), получим выражение для работы газа при адиабатном расширении:

$$A = \frac{C_V(p_1V_1 - p_2V_2)}{C_p - C_V}. \qquad (38.7)$$

ЗАПОМНИТЕ

Отношение теплоёмкостей $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$ называется **коэффициентом Пуассона**.

Его можно выразить через число степеней свободы. В самом деле, удельная теплоёмкость при постоянном объёме $c_V = \frac{iR}{2M}$ (см. формулу (38.3)), а удельная теплоёмкость при постоянном давлении согласно выражению (38.4) равна $c_p = c_V + \frac{R}{M} = \frac{i}{2}\frac{R}{M} + \frac{R}{M} = \frac{R}{M}\left(\frac{i}{2} + 1\right) = \frac{i+2}{2}\frac{R}{M}$.

Тогда для коэффициента Пуассона будем иметь

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}.$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

У одноатомного газа $i = 3$, следовательно, $\gamma = \frac{3+2}{3} = \frac{5}{3} = 1{,}67$.

У двухатомного газа $i = 5$, следовательно, $\gamma = \frac{5+2}{5} = \frac{7}{5} = 1{,}4$.

Разделив числитель и знаменатель выражения (38.7) на C_V, получим окончательно для работы при адиабатном расширении газа:

$$A = \frac{p_1V_1 - p_2V_2}{\gamma - 1}.$$

Уравнение Пуассона*. Как известно, соотношение между давлением и объёмом идеального газа при изотермическом процессе выражается законом Бойля—Мариотта $pV = \text{const}$. Графиком этого процесса в координатных осях $p—V$

является гипербола. Каким же соотношением связаны давление и объём газа при адиабатном процессе?

Мы не будем выводить искомое соотношение, а запишем его в готовом виде:

$$pV^{\gamma} = \text{const}.$$

ЗАПОМНИТЕ Выражение $pV^{\gamma} = \text{const}$ называется **уравнением адиабаты** или **уравнением Пуассона**.

График адиабаты показан на рисунке 3.9.

Используя уравнение состояния идеального газа, можно уравнение адиабаты записать ещё в двух видах:

$$TV^{\gamma-1} = \text{const}, \quad \frac{p^{\gamma-1}}{T^{\gamma}} = \text{const}.$$

Предлагаем читателю получить эти соотношения самостоятельно.

Теплоёмкость твёрдых тел. Тепловое движение частиц, из которых состоят кристаллы, в основном сводится к колебаниям частиц около положения равновесия. В твёрдом теле в отличие от газов велика потенциальная энергия взаимодействия атомов и молекул. Как и у тела, совершающего гармонические колебания под действием сил упругости, средние значения изменений кинетической и потенциальной энергий частицы в твёрдом теле одинаковы. На одну степень свободы колебательного движения приходится энергия, в два раза большая, чем на одну степень свободы поступательного движения, т. е. $2\left(\frac{1}{2}kT\right) = kT$. Полная энергия колебательного движения одного атома равна $\overline{E}_{кол} = 3kT$. Следовательно, изменение внутренней энергии одноатомного твёрдого тела при изменении его температуры $\Delta U = 3k\Delta TN$, где N — число атомов.

Пренебрегая работой при изменении объёма твёрдого тела, можно считать, что удельная теплоёмкость вещества в твёрдом состоянии равна:

$$c_p = \frac{Q_p}{m\Delta T} = \frac{\Delta U}{m\Delta T} = \frac{3k\Delta TN}{m\Delta T} = \frac{3kN}{m} = \frac{3R}{M}.$$

Молярная теплоёмкость вещества в твёрдом состоянии равна:

$$C = cM = 3R.$$

Этот вывод, сделанный на основе предположения о справедливости для твёрдых тел закона равнораспределения энергии по степеням свободы, подтверждается результатами, полученными экспериментально для многих веществ в твёрдом состоянии, в частности для металлов. Приблизительное равенство молярных теплоёмкостей различных элементов в твёрдом состоянии было установлено на основании опытов в 1819 г. французскими физиками П. Дюлонгом (1785—1838) и А. Пти (1791—1820) (*закон Дюлонга—Пти*).

Рассмотренная нами классическая теория теплоёмкости твёрдых тел является очень грубым приближением к действительности. Основные особенности поведения твёрдых тел в процессах теплопередачи объясняет квантовая теория строения вещества.

Количество теплоты. Удельная теплоёмкость. Уравнение теплового баланса. Степени свободы. Молярная теплоёмкость. Уравнение Майера. Уравнение Пуассона

1. Как можно определить удельную теплоёмкость вещества, не сравнивая её с удельными теплоёмкостями каких-либо других веществ? 2. Почему удельные теплоёмкости одноатомных и многоатомных газов не совпадают? 3. Почему теплоёмкости химических элементов в кристаллическом состоянии в два раза больше теплоёмкости одноатомных газов? 4. Какие тепловые свойства веществ не могла объяснить классическая молекулярно-кинетическая теория?

ЗАДАЧА 1. Одним из способов получения высоких температур является адиабатное сжатие газов. Для этого можно воспользоваться, например, толстостенным цилиндром, закрытым с обеих сторон, с перемещающимся в нём поршнем. По одну сторону от поршня помещается пороховой заряд, а по другую — газ. При взрыве пороха поршень «выстреливается» и производит адиабатное сжатие газа в цилиндре. Вычислите максимальную температуру сжатого водорода массой 2 г, если пороховой заряд сообщает поршню массой 1 кг начальную скорость 1 км/с.

Решение. В соответствии с первым законом термодинамики $\Delta U = A + Q$. Поршень совершает работу за счёт полученной в результате взрыва пороха кинетической энергии: $A = \frac{mv^2}{2}$. Так как процесс адиабатный, то $Q = 0$; $\Delta U = A$. Увеличение внутренней энергии газа $\Delta U = m_1 c_1 \Delta T$, где c_1 — удельная теплоёмкость двухатомного водорода: $c_1 = \frac{iR}{2M} = \frac{5R}{2M}$. Тогда $m_1 \frac{5R}{2M} \Delta T = \frac{mv^2}{2}$. Отсюда $\Delta T = \frac{Mmv^2}{5m_1 R} = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^6}{5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 8{,}31}$ (К) $= 2{,}4 \cdot 10^4$ К.

Полученный результат представляет собой лишь оценку изменения температуры водорода, так как в расчётах не учитывались такие явления, как распад молекул и ионизация атомов водорода при высоких температурах.

ЗАДАЧА 2. Чему равна молярная теплоёмкость идеального газа в процессе, в котором давление пропорционально объёму газа: $p = \alpha V$, если молярная теплоёмкость газа при постоянном объёме равна C_1?

Решение. В соответствии с первым законом термодинамики

$$Q = \Delta U + A = C_1 \Delta T + A.$$

Работу A, совершаемую газом, взятым в количестве 1 моль, при расширении по закону $p = \alpha V$, можно рассчитать по формуле

$$A = p_{ср} \Delta V = \frac{p_1 + p_2}{2}(V_2 - V_1) = \frac{\alpha(V_1 + V_2)}{2}(V_2 - V_1) = \frac{\alpha(V_2^2 + V_1^2)}{2}.$$

Этот же результат легко найти, рассчитав площадь под графиком $p = \alpha V$ в координатах p, V.

Используя уравнение Менделеева—Клапейрона $pV = RT$ с учётом условия задачи ($p = \alpha V$), получаем $\alpha V^2 = RT$.

Подставив полученный результат в выражение для работы газа, будем иметь

$$A = \frac{R}{2}(T_2 - T_1) = \frac{R}{2}T.$$

Отсюда молярная теплоёмкость газа при данном процессе

$$C = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{\left(C_1\Delta T + \frac{R\Delta T}{2}\right)}{\Delta T} = C_1 + \frac{R}{2}.$$

РЕШИТЕ

38.1. В вертикальном цилиндре высотой $h_1 = 2$ м с теплоизолированными стенками находится гелий массой $m_{He} = 0{,}32$ г при температуре $T_1 = 27$ °С. На какой высоте окончательно установится поршень массой $m = 40$ кг, опущенный сверху и движущийся в цилиндре без трения, если над поршнем вакуум?

38.2. В цилиндре с поршнем находится некоторое количество гелия. К газу подвели количество теплоты, равное 14 кДж. На сколько изменится внутренняя энергия газа? Чему равна работа расширения? Процесс происходит изобарно.

38.3. Решите предыдущую задачу при условии, что в цилиндре находится водород.

38.4. В цилиндре с поршнем находится неон. При начальном давлении 0,2 МПа его объём равен 0,4 м^3. Определите давление газа, если его объём адиабатно увеличился в три раза.

38.5. Чему должна быть равна степень сжатия воздуха, чтобы его температура возросла с 20 до 800 °С? Сжатие считайте адиабатным, воздух — двухатомным газом.

38.6. Определите удельную теплоёмкость водорода, гелия и кислорода при постоянном давлении. Сравните с табличными данными.

38.7. Определите удельную теплоёмкость серы, железа, меди, ртути и алюминия. Сравните с табличными данными (при температурах от 20 до 100 °С).

38.8. Удельная теплоёмкость алмаза при 20 °С равна 0,5 кДж/(кг · К), графита при 100 °С — 0,934 кДж/(кг · К), а при 1000 °С — 1,7 кДж/(кг · К). Соответствуют ли эти значения закону Дюлонга—Пти?

§ 39. Принцип действия тепловой машины

Повторите: свойства газа, циклические процессы.

Основные части теплового двигателя. В современной технике механическую энергию получают главным образом за счёт внутренней энергии топлива.

ЗАПОМНИТЕ Устройства, в которых происходит преобразование внутренней энергии в механическую, называют **тепловыми двигателями**.

Устройство для совершения работы за счёт сжигания топлива в нём называется **нагревателем**.

В качестве нагревателя можно использовать цилиндр, где нагревается и расширяется газ, который перемещает поршень.

ЗАПОМНИТЕ Газ, расширение которого вызывает перемещение поршня, называют **рабочим телом**.

Расширяется же газ потому, что его давление выше внешнего давления. Но при расширении газа его давление падает, и рано или поздно оно станет равным внешнему давлению. Тогда расширение газа закончится, и он перестанет совершать работу.

Как же следует поступить, чтобы работа теплового двигателя не прекращалась?

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Для того чтобы двигатель работал непрерывно, необходимо, чтобы поршень после расширения газа возвращался каждый раз в исходное положение, сжимая газ до первоначального состояния.

Сжатие же газа может происходить только под действием внешней силы, которая при этом совершает работу (сила давления газа в этом случае совершает отрицательную работу). После этого вновь могут происходить процессы расширения и сжатия газа. Значит, работа теплового двигателя должна состоять из периодически повторяющихся процессов (циклов) расширения и сжатия.

В качестве примера рассмотрим принцип работы поршневого теплового двигателя, не останавливаясь подробно на его устройстве. В таком двигателе газ (рабочее тело) давит на поршень, который перемещается в цилиндре, как, например, в автомобильном двигателе. Для простоты рассуждений будем считать, что в двигателе используется всё время одна и та же порция газа.

Когда газ расширяется, он движет поршень. Движение поршня передаётся валу двигателя с сидящим на нём маховиком. Для сжатия газа поршень должен переместиться под действием внешней силы в противоположном направлении. Это движение совершается за счёт кинетической энергии, запасённой маховиком в процессе расширения газа.

Если работа, совершаемая при сжатии газа под действием внешней силы, по абсолютному значению равна работе, совершаемой при его расширении, то общая работа за цикл равна нулю. Отсюда следует, что если мы хотим полу-

чить полезную работу, то необходимо, чтобы работа сжатия газа была меньше работы расширения.

А чтобы работа при сжатии была по абсолютному значению меньше работы расширения, нужно, чтобы каждому значению объёма при сжатии соответствовало меньшее давление, чем при расширении.

Давление газа при одном и том же объёме тем меньше, чем ниже его температура. Поэтому газ перед сжатием должен быть охлаждён. Для этого его необходимо привести в контакт с телом, имеющим более низкую температуру.

ЗАПОМНИТЕ Тело, имеющее более низкую температуру, чем рабочее тело, и при контакте охлаждающее его, называется **холодильником**.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Нагреватель, рабочее тело и холодильник — основные части теплового двигателя.

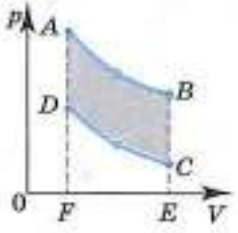


Рис. 3.14

На рисунке 3.14 изображены графически процессы расширения газа (линия AB) и сжатия до первоначального объёма (линия CD). Работа газа в процессе расширения положительна ($\Delta V > 0$) и численно равна площади фигуры $ABEF$. Работа газа при сжатии отрицательна (так как $\Delta V < 0$) и численно равна площади фигуры $DCEF$. Полезная работа за этот цикл численно равна разности площадей под кривыми AB и CD (закрашена на рисунке).

Таким образом, мы выяснили, что для получения при циклическом процессе полезной механической работы расширение газа (рабочего тела) должно происходить при более высокой температуре, чем сжатие, т. е. от нагревателя газ должен получить количество теплоты Q_1, которое больше количества теплоты Q_2, отданной холодильнику при сжатии.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Наличие нагревателя, рабочего тела и холодильника принципиально необходимое условие для непрерывной циклической работы любого теплового двигателя.

Коэффициент полезного действия тепловой машины. Рабочее тело, получая некоторое количество теплоты Q_1 от нагревателя, часть этого количества теплоты, равную $|Q_2|$, отдаёт холодильнику[1]. Поэтому совершаемая работа не может быть больше $A = Q_1 - |Q_2|$.

ЗАПОМНИТЕ Отношение совершаемой работы к количеству теплоты, полученной расширяющимся газом от нагревателя, называется **коэффициентом полезного действия** η тепловой машины:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}.$$

[1] Напомним, что количество теплоты, отданной телом, является величиной отрицательной, т. е. $Q_2 < 0$.

Коэффициент полезного действия тепловой машины, работающей по замкнутому циклу, всегда меньше единицы. Задача теплоэнергетики состоит в том, чтобы сделать КПД как можно более высоким, т. е. использовать для получения работы как можно большую часть тепла, полученного от нагревателя. Как этого можно достигнуть?

ИНТЕРЕСНО

Тепловая машина с наибольшим КПД. При расширении или сжатии газа должны быть использованы процессы, позволяющие исключить уменьшение энергии горячего тела, которое происходило бы без совершения работы. Такие процессы существуют — это изотермический и адиабатный процессы.

Впервые наиболее совершенный циклический процесс, состоящий из изотерм и адиабат, был предложен французским физиком и инженером С. Карно (1796—1832) в 1824 г.

Сади Карно искал пути решения актуальной для того времени задачи — установить причину несовершенства тепловых машин, найти пути наиболее эффективного их использования. Его труды — яркий в истории физики пример взаимного влияния науки и техники.

Цикл Карно. Допустим, что газ находится в цилиндре, стенки и поршень которого сделаны из теплоизоляционного материала, а дно — из материала с высокой теплопроводностью. Объём, занимаемый газом, равен V_1.

Приведём цилиндр в контакт с нагревателем (рис. 3.15, *а*) так, чтобы газ стал изотермически расширяться и совершать работу (рис. 3.15, *б*). Газ получает при этом от нагревателя некоторое количество теплоты Q_1. Этот процесс графически изображается изотермой (кривая AB, рис. 3.16).

Когда объём газа становится равным некоторому значению $V_1' < V_2$, дно цилиндра изолируют от нагревателя (рис. 3.15, *в*), после этого газ расширяется адиабатно до объёма V_2, соответствующего максимально возможному ходу поршня в цилиндре (адиабата BC, см. рис. 3.16). При этом газ охлаждается до температуры $T_2 < T_1$.

Теперь охлаждённый газ можно изотермически сжимать при температуре T_2. Для этого его нужно привести в контакт с телом, имеющим ту же температуру T_2, т. е. с холодильником (рис. 3.15, *г*), и сжать газ внешней силой.

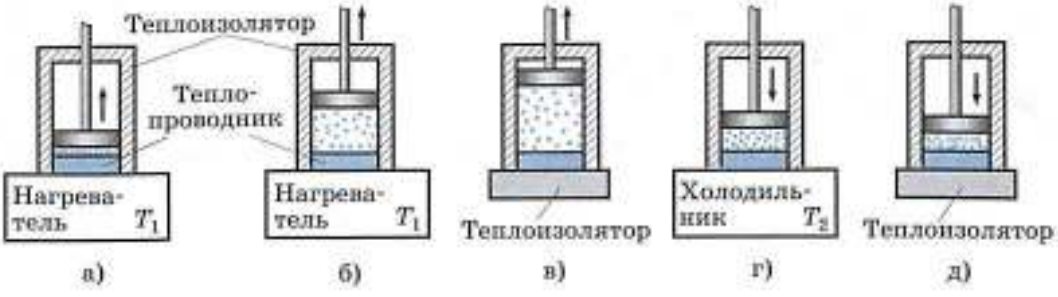


Рис. 3.15

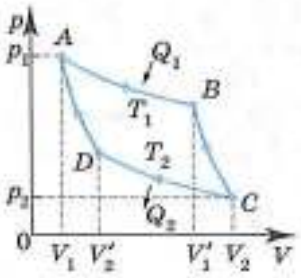


Рис. 3.16

Однако в этом процессе газ не вернётся в первоначальное состояние — температура его будет всё время ниже чем T_1.

Поэтому изотермическое сжатие доводят до некоторого промежуточного объёма $V_2' > V_1$ (изотерма CD, см. рис. 3.16). При этом газ отдаёт холодильнику некоторое количество теплоты Q_2, равное совершаемой над ним работе сжатия. После этого газ сжимается адиабатно до объёма V_1 (рис. 3.15, *д*), при этом его температура повышается до T_1 (адиабата DA, см. рис. 3.16). Теперь газ вернулся в первоначальное состояние, при котором объём его равен V_1, температура — T_1, давление — p_1, и цикл можно повторить вновь.

Итак, на участке ABC газ совершает работу ($A > 0$), а на участке CDA работа совершается над газом ($A < 0$). На участках BC и AD работа совершается только за счёт изменения внутренней энергии газа. Поскольку изменение внутренней энергии $\Delta U_{BC} = -\Delta U_{DA}$, то и работы при адиабатных процессах равны: $A_{BC} = -A_{DA}$. Следовательно, полная работа, совершаемая за цикл, определяется разностью работ, совершаемых при изотермических процессах (участки AB и CD). Численно эта работа равна площади фигуры, ограниченной кривой цикла $ABCD$ (см. рис. 3.16).

В полезную работу фактически преобразуется только часть количества теплоты Q_{T1}, полученной от нагревателя, равная $Q_{T1} - |Q_{T2}|$. Итак, в цикле Карно полезная работа $A = Q_{T1} - |Q_{T2}|$.

Максимальный коэффициент полезного действия идеального цикла, как показал С. Карно, может быть выражен через температуры нагревателя (T_1) и холодильника (T_2):

$$\eta_{\text{ид}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \qquad (39.1)$$

В реальных двигателях не удаётся осуществить цикл, состоящий из идеальных изотермических и адиабатных процессов. Поэтому КПД цикла, осуществляемого в реальных двигателях, всегда меньше, чем КПД цикла Карно (при одних и тех же температурах нагревателей и холодильников):

$$\eta < \eta_{\text{ид}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Из формулы (39.1) видно, что КПД двигателей тем больше, чем выше температура нагревателя и чем ниже температура холодильника.

Конечно, КПД был бы равен 100%, если бы температура холодильника была равна абсолютному нулю. Но это невозможно.

В современных двигателях обычно КПД увеличивают за счёт повышения температуры нагревателя. В мощных паровых турбинах в настоящее время

используют пар, температура которого достигает 600 °С. В газовых турбинах температура газа достигает 900 °С. Дальнейшее повышение температуры нагревателя ограничивается отсутствием достаточно жаростойких материалов. Холодильниками этих двигателей служит атмосфера с температурой порядка 20 °С. Вычисленный по формуле (39.1) КПД тепловых машин при указанных температурах нагревателя и холодильника должен был бы достигать 66—75%, реальный же КПД этих двигателей равен 30—35%.

Тепловой двигатель. Рабочее тело. Термостат. Коэффициент полезного действия. Цикл Карно

ЗАДАЧА 1. В цилиндре тепловой машины находится одноатомный идеальный газ в количестве 1 моль. Определите КПД тепловой машины, если изменение состояния газа в цилиндре осуществляется по циклу, показанному на рисунке 3.17.

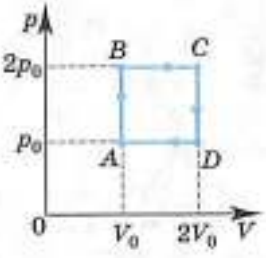


Рис. 3.17

Решение. КПД тепловой машины

$$\eta = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = \frac{A}{Q_1}.$$

Количество теплоты

$$Q_1 = Q_{AB} + Q_{BC} = mc_V(T_B - T_A) + mc_V(T_C - T_B) + 2p_0V_0,$$

так как

$$Q_{AB} = \Delta U_1, \quad Q_{BC} = \Delta U_2 + A_1,$$

$A_1 = 2p_0V_0$, $A = p_0V_0$ (площадь внутри синего прямоугольника).

Тогда $\eta = \dfrac{p_0V_0}{mc_V(T_C - T_A) + 2p_0V_0}$.

Из уравнения Менделеева—Клапейрона для состояний A и B получим

$$\frac{p_AV_A}{T_A} = \frac{p_BV_B}{T_B}, \text{ или } \frac{p_0V_0}{T_A} = \frac{2p_0V_0}{T_B}.$$

Отсюда $T_B = 2T_A$.

Для состояний C и B аналогично получим

$$\frac{p_BV_B}{T_B} = \frac{p_CV_C}{T_C}; \quad \frac{2p_0V_0}{T_B} = \frac{2p_02V_0}{T_C}; \quad T_C = 2T_B = 4T_A.$$

Обозначив $T_A = T_0$, подставим найденные значения T_B и T_C в выражение для КПД:

$$\eta = \frac{p_0V_0}{mc_V(4T_0 - T_0) + 2p_0V_0}.$$

Так как $\nu = 1$ моль, $C_V = \dfrac{3}{2}\dfrac{R}{M}$, то $p_0V_0 = RT_0$, поэтому

$$\eta = \frac{p_0V_0}{m\dfrac{3}{2}\dfrac{R}{M}3T_0 + 2p_0V_0} = \frac{p_0V_0}{\dfrac{9}{2}p_0V_0 + 2p_0V_0} = \frac{2p_0V_0}{13p_0V_0} \approx 0{,}15.$$

ЗАДАЧА 2. На рисунке 3.18 представлены диаграммы двух циклов Карно: *ABCDA* и *ABC'D'A*. На каком из этих циклов тепловая машина обладает большим КПД?

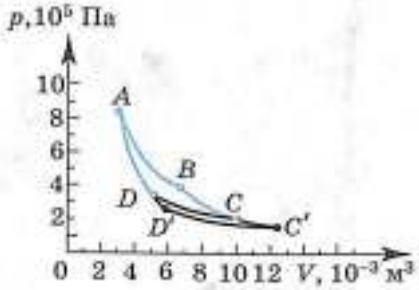


Рис. 3.18

Решение. КПД идеальной тепловой машины определяется выражением

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Температура T_1 нагревателя в двух циклах одинакова, так как изотерма AB у них общая. Температура T_2 холодильника при работе по циклу $ABC'D'A$ ниже, так как адиабатное расширение газа происходит до большего объёма. Следовательно, КПД при работе по циклу $ABC'D'A$ выше, чем при работе по циклу $ABCDA$. Это непосредственно видно и из сравнения площадей обоих циклов.

РЕШИТЕ 39.1. При переходе идеального газа, взятого в количестве 1 моль, из состояния B с температурой T в состояние D с той же температурой газ совершил работу 8300 Дж (рис. 3.19). Определите температуру газа в состояниях B и C.

39.2. В идеальной тепловой машине газ отдал холодильнику 55% количества теплоты, полученной от нагревателя. Определите температуру холодильника, если температура нагревателя 327 °C.

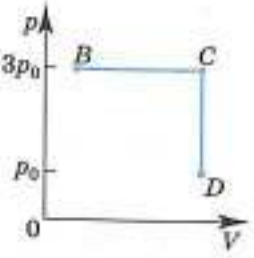


Рис. 3.19

Принцип работы бытовых приборов, основанный на циклических процессах.

§ 40. Необратимость тепловых процессов

Повторите: термодинамические процессы.

Необратимые и обратимые процессы. Ограничения, накладываемые на полное использование внутренней энергии при совершении механической работы тепловыми двигателями, не вытекают из первого закона термодинамики. Этот закон «запрещает» лишь получение большей работы, чем было затрачено энергии, т. е. исключает возможность создания так называемого вечного двигателя первого рода. Но если бы энергия нагревателя уменьшилась, например, на 100 Дж и при этом была бы совершена работа 100 Дж, то это не противоречило бы первому закону термодинамики. Однако циклический процесс, при котором всё количество теплоты, полученной от нагревателя, шло бы на совершение работы, невозможен. Неизбежно некоторая часть этого количества теплоты отдаётся другим телам с более низкой температурой.

Значит, возможны не все процессы, находящиеся в согласии с первым законом термодинамики. В самом деле, представим себе, что в калориметр с холодной водой опустили горячее тело. Если бы при этом холодная вода остыла и некоторое количество теплоты передала горячему телу, которое бы при этом ещё больше нагрелось, то такое явление не противоречило бы первому закону термодинамики: баланс энергии был бы соблюдён. Но такой процесс в природе никогда не происходит.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Самопроизвольно происходящие процессы теплообмена между телами всегда протекают так, что горячее тело охлаждается, передавая энергию менее нагретому телу, температура которого повышается. Обратный этому процесс самопроизвольно никогда не происходит.

ЗАПОМНИТЕ **Самопроизвольными** процессами называют процессы, которые происходят без воздействия внешних тел, а значит, без изменений в этих телах.

Процесс теплообмена происходит до тех пор, пока температуры тел не сравняются — в системе тел устанавливается тепловое равновесие.

Рассмотрим ещё один процесс, обратный которому самопроизвольно не протекает. Сжатый газ, находящийся в цилиндре с подвижным поршнем, расширяется до тех пор, пока его давление не станет равно внешнему давлению. Но никогда не наблюдается самопроизвольное сжатие газа. В результате хаотичного движения молекул газ всегда занимает весь предоставленный ему объём. Сжать газ можно, только действуя на него внешней силой. При этом в окружающих телах произойдут изменения: тело, которое сжимает газ, совершает работу, а следовательно, оно теряет некоторую энергию.

ЗАПОМНИТЕ Процессы, обратные которым самопроизвольно не происходят, называют **необратимыми**.

Процессы перехода системы из одного состояния в другое, которые можно провести в обратном направлении через ту же последовательность промежуточных равновесных состояний, называются **обратимыми**. При этом сама система и окружающие тела полностью возвращаются к исходному состоянию.

Механические движения, происходящие без трения, обратимы, т. е. обратимыми являются механические процессы в консервативных системах. Реальные же процессы в природе, протекающие с трением, необратимы. Например, колебания маятника при наличии трения затухают, и маятник останавливается. В этом случае механическая энергия маятника убывает, а температура маятника и окружающей среды повышается, т. е. увеличивается внутренняя энергия этих тел. Процесс превращения механической энергии во внутреннюю энергию необратим.



Рис. 3.20

Почему процессы в природе необратимы? Чтобы ответить на этот вопрос, вспомним, что тела состоят из огромного числа частиц, находящихся в непрерывном хаотичном движении. Возьмём для примера самую простую систему — идеальный газ. Пусть в начале опыта газ находится в одной из половин сосуда, а в другой половине создан вакуум. Если убрать заслонку, то газ займёт весь объём сосуда (рис. 3.20), и его плотность станет по всему объёму одинаковой. Одинаковыми станут также давление и температура газа во всех участках сосуда. Система перейдёт в равновесное состояние. После этого макроскопические параметры системы больше не будут изменяться, хотя молекулы газа будут двигаться по всему объёму сосуда, меняя свои скорости при соударении со стенками сосуда и друг с другом.

Практически нам не удастся обнаружить состояние, при котором все молекулы газа собирались бы вновь в одной половине сосуда. Это и говорит о том, что расширение газа в пустоту — процесс необратимый. Разумеется, несамопроизвольно, под действием внешней силы, молекулы газа могут собраться в одной половине сосуда. Например, если бы вместо правой стенки сосуда был бы поршень, то, переместив его, можно было бы собрать газ в левой половине сосуда. Почему же не наблюдаются состояния, когда все молекулы газа самопроизвольно оказываются в одной половине сосуда?

Всё дело в том, что газ состоит из огромного числа молекул. Рассмотрим, что было бы, если бы частиц было немного. Как они могли бы распределяться между половинами сосуда?

Если в сосуде одна молекула, то число различных способов её распределения между половинами сосуда $N = 2$ — она находится либо в одной, либо в другой половине сосуда. Из этих двух возможностей, например, нахождению частицы в левой половине сосуда соответствует один способ. Вероятность найти молекулу в любой половине сосуда, очевидно, равна 1/2, т. е. 50%.

В случае двух частиц ($n = 2$) общее число возможных распределений между частями сосуда $N = 4 = 2^2$. Но существует только один случай, когда все частицы находятся в левой части сосуда, и два случая ($K = 2$), когда частицы распределены поровну между частями сосуда.

Для 10 частиц ($n = 10$) общее число возможных распределений $N = 1024 = 2^{10}$. Но есть только один из способов, когда все частицы размещены в одной половине сосуда, и 252 способа, когда они распределены равномерно по обеим половинам сосуда.

Обобщая рассмотренные случаи для любого числа частиц n, можно сказать, что общее число возможных размещений частиц между двумя половинами сосуда равно $N = 2^n$. И только один случай из этого числа соответствует распределению частиц, при котором все они будут в одной половине сосуда. Число же способов, при котором частицы распределены по объёму равномерно, растёт с увеличением числа частиц, и тем быстрее, чем их больше.

Необратимость и вероятность.

ЗАПОМНИТЕ

Вероятность какого-либо случайного события определяется как отношение числа случаев K, соответствующих наступлению ожидаемого события, к общему числу возможных случаев N, если все случаи равновозможны:

$$P = \frac{K}{N}.$$

Число молекул газа, содержащихся, например, в веществе, взятом в количестве 1 моль, огромно: оно равно примерно $6 \cdot 10^{23}$. В этом случае число возможных размещений молекул по обеим половинам сосуда $N = 2^n = 2^{6 \cdot 10^{23}}$. Это невообразимо большое число. И только в одном из этих случаев все молекулы снова соберутся в левой части сосуда. Значит, вероятность такого события $P_0 = \frac{1}{N} = \frac{1}{2^{6 \cdot 10^{23}}} \approx 0$. Совершенно очевидно, что такое событие настолько маловероятно, что можно считать его практически невозможным.

Наибольшее число случаев из $N = 2^{6 \cdot 10^{23}}$ соответствует равномерному или очень близкому к равномерному распределению молекул по всему объёму сосуда. Поэтому вероятность такого события максимальна и практически именно оно всегда наблюдается в эксперименте. Значит, равномерное распределение молекул в сосуде является наиболее вероятным состоянием. Вот почему газ самопроизвольно практически никогда не собирается в одной половине сосуда, так как это был бы самопроизвольный переход от более вероятного состояния к состоянию, вероятность которого ничтожно мала.

Малой вероятностью события объясняются и другие необратимые процессы. Например, диффузия необратима потому, что процесс полного разделения образовавшейся смеси различных частиц по разным частям сосуда осуществляется лишь одним способом из огромного числа возможных распределений.

Второй закон термодинамики. В § 39 мы выяснили, что существуют определённые ограничения на полное использование внутренней энергии нагревателя для совершения работы в циклических тепловых двигателях. Главная особенность циклического теплового двигателя состоит в том, что рабочее тело в нём, получая некоторое количество теплоты от нагревателя и производя работу, обязательно отдаёт часть тепла холодильнику.

Значит, количество теплоты, полученной от нагревателя, не может быть целиком преобразовано в механическую работу циклически действующей тепловой машиной. Это утверждение представляет собой важный закон природы, получивший название *второго закона термодинамики*.

ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ (1) В циклически действующей тепловой машине невозможен процесс, единственным результатом которого было бы преобразование в механическую работу всего количества теплоты, полученной от источника энергии — нагревателя.

Именно так этот закон впервые был сформулирован У. Кельвином в 1851 г.

Второй закон термодинамики непосредственно связан с необратимостью процессов в природе.

В самом деле, если бы количество теплоты Q_2 самопроизвольно могло бы переходить обратно от холодильника к нагревателю, то работа совершалась бы за счёт всего количества теплоты Q_1, полученной от нагревателя. Однако количество теплоты от холодного тела к горячему самопроизвольно никогда не переходит. Значит, невозможность получения работы за счёт всего количества теплоты, полученной от нагревателя, связана с необратимостью тепловых процессов. В связи с этим возможна другая формулировка *второго закона термодинамики*, данная Р. Клаузиусом.

ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ (2) Невозможен процесс, единственным результатом которого была бы передача энергии от холодного тела к горячему.

Разумеется, совершая работу за счёт внешнего источника энергии, можно отбирать энергию у холодного тела и передавать её горячему. Это, например, происходит в холодильниках, где такой процесс совершается за счёт работы двигателя, потребляющего электрическую энергию.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Второй закон термодинамики имеет вероятностный характер. В отличие от закона сохранения энергии, который может быть применён к отдельным частицам (молекулам, атомам), второй закон термодинамики применим лишь к системам, состоящим из очень большого числа частиц.

Для таких систем необратимость процессов объясняется тем, что обратный переход должен был бы привести систему в состояние с ничтожно малой вероятностью, практически неотличимой от невозможности.

Самопроизвольные процессы в изолированной системе всегда происходят в направлении перехода от маловероятного состояния в более вероятное.

ИНТЕРЕСНО Второй закон термодинамики позволяет понять, почему некоторые источники энергии, находящиеся вокруг нас, бесполезны. Заманчивым кажется использование почти безграничного запаса внутренней энергии, содержащейся в атмосфере и в водах океанов. Нетрудно оценить, каким огромным запасом внутренней энергии обладает окружающая Землю атмосфера, масса которой равна примерно 10^{18} кг. Ещё большим запасом внутренней энергии обладают моря и океаны. Масса воды в Мировом океане составляет около 10^{21} кг. Охлаждение её только на один градус привело бы к выделению энергии порядка 10^{24} Дж. Это в 10 000 раз больше всей энергии, вырабатываемой на земном шаре за год.

Казалось бы, энергетические запасы на земном шаре почти безграничны. Однако внутреннюю энергию морей и океанов не причисляют к энергетиче-

ским запасам. Ведь для получения работы за счёт этой энергии необходимо иметь столь же гигантский холодильник, который принимал бы часть этого огромного количества теплоты и при этом не нагревался бы сам до температуры Океана.

Двигатель, который мог бы совершать работу только за счёт источника энергии без холодильника, получил название вечного двигателя второго рода, так как он мог бы работать непрерывно за счёт почти безграничных запасов энергии. Создание вечного двигателя второго рода противоречит второму закону термодинамики.

В последнее время появились проекты получения механической энергии за счёт использования разности температур между глубинными и поверхностными слоями морей и океанов. Эти проекты связаны с огромными техническими трудностями, но не противоречат законам термодинамики.

Почему необходимо экономное расходование энергии? Второй закон термодинамики помогает понять сущность энергетической проблемы, стоящей перед человечеством.

Как известно, первый закон термодинамики утверждает, что энергия изолированной системы сохраняется. «...Природа как целое содержит определённый запас энергии, который не может быть ни уменьшен, ни увеличен, и что поэтому количество энергии в природе вечно и неизменно...» — писал Г. Гельмгольц, который был одним из первых физиков XIX в., сформулировавших закон сохранения энергии.

Казалось бы, этот закон не даёт оснований беспокоиться о запасах в природе энергии и её экономии. Энергетические ресурсы планеты — это главным образом та внутренняя энергия, которая содержится в топливе. Она составляет более 80% всех энергетических запасов Земли. Эта энергия используется для обогрева помещений, в ряде технологических процессов, в различных тепловых машинах.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Несмотря на существование закона сохранения энергии, необходимо экономное расходование энергии, ведь запасы топлива в природе ограниченны и минеральное топливо (нефть, уголь, газ) невозобновляемо.

Обратимые и необратимые процессы. Второй закон термодинамики

1. Что такое вероятность случайного события? 2. Какие процессы являются необратимыми? 3. Как связаны между собой необратимость и вероятность? 4. В чём смысл второго закона термодинамики?

Обоснование невозможности создания вечного двигателя.

§ 41*. Устройство и принцип действия тепловых машин

Повторите: тепловой двигатель.

Тепловые машины и развитие техники. Развитие энергетики является одной из важнейших предпосылок научно-технического прогресса. Мощный расцвет промышленности и транспорта в XIX в. был связан с изобретением и усовершенствованием первого теплового двигателя — паровой машины. Создание паровых, а затем газовых турбин и двигателей внутреннего сгорания полностью преобразовало всю энергетику, позволило создать крупные морские суда, автомобильный и воздушный транспорт, космические ракеты, построить тепловые электростанции и на этой основе реорганизовать всю промышленность.

Впервые практически действующие универсальные паровые машины были созданы гениальным русским изобретателем-самоучкой И. И. Ползуновым (1728—1766) в 1763 г. и шотландским изобретателем Дж. Уаттом (1736—1819) в 1764 г.

Конструкция первых паровых машин имела основные части всех последующих тепловых машин: нагреватель, в котором освобождалась энергия топлива; водяной пар как рабочее тело и поршень с цилиндром, преобразующий внутреннюю энергию пара в механическую энергию; охладитель, необходимый для снижения температуры и давления пара.

Главным недостатком паровых машин был низкий КПД, не превышающий 9%.

Поршневой двигатель внутреннего сгорания. Среди способов увеличения КПД тепловых двигателей один оказался особенно перспективным. Сущность его состояла в уменьшении потерь теплоты за счёт перенесения места сжигания топлива и нагревания рабочего тела внутрь цилиндра. Отсюда и происхождение названия «двигатель внутреннего сгорания» (ДВС). Естественно, что для двигателей внутреннего сгорания наиболее удобным топливом является газообразное или жидкое.

Первый двигатель внутреннего сгорания был создан в 1860 г. французским инженером Э. Ленуаром. Этот двигатель не имел трубы, топки и котла. Вместо пара в цилиндр при движении поршня засасывалась смесь светильного газа и воздуха. Когда поршень проходил расстояние, равное половине своего хода, закрывался впускной клапан и горючая смесь воспламенялась электрической искрой. Под давлением продуктов сгорания поршень двигался дальше, совершая рабочий ход. В конце рабочего хода открывался выпускной клапан, и поршень при обратном ходе выталкивал продукты сгорания из цилиндра.

В 1862 г. французским инженером Боде Роша было предложено использовать в двигателе внутреннего сгорания четырёхтактный цикл: всасывание, сжатие, горение и расширение, выхлоп. Эта идея была использована немецким изобретателем Н. Отто, построившим в 1878 г. первый четырёхтактный газовый двигатель внутреннего сгорания. КПД этого двигателя достигал 22%,

что превышало значения, полученные при использовании двигателей всех предшествующих типов.

Карбюраторный двигатель. Развитие нефтяной промышленности в конце XIX в. дало новые виды топлива — керосин, бензин. В бензиновом двигателе для более полного сгорания топлива перед впуском в цилиндр его смешивают с воздухом в специальных смесителях, называемых *карбюраторами*. Воздушно-бензиновую смесь называют *горючей смесью*.

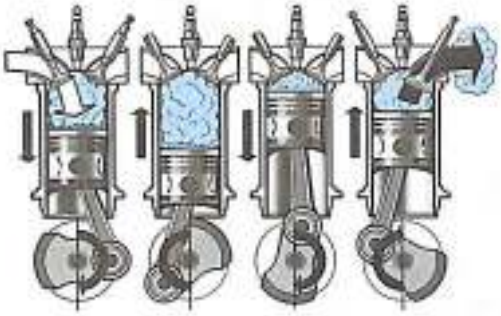


Рис. 3.21

Расчёты показывают, что для полного сгорания смеси на единицу массы бензина должно приходиться не менее 15 единиц массы воздуха. Это означает, что рабочим телом в двигателях внутреннего сгорания фактически является воздух, а не пары бензина. Топливо здесь сжигается для нагревания воздуха. При движении поршня от верхнего положения до нижнего через впускной клапан происходит всасывание горючей смеси в цилиндр (рис. 3.21). Этот процесс происходит при постоянном давлении. При обратном ходе поршня начинается сжатие горючей смеси. Сжатие происходит быстро, и поэтому процесс близок к адиабатному.

В конце такта сжатия происходит воспламенение горючей смеси электрической искрой. Быстрое сгорание паров бензина сопровождается передачей рабочему телу количества теплоты Q_1, резким возрастанием температуры и давления воздуха и продуктов сгорания. За короткое время горения смеси поршень практически не изменяет своего положения в цилиндре, поэтому процесс нагревания газа в цилиндре можно считать почти изохорным.

Под действием высокого давления поршень далее совершает рабочий ход от верхнего положения до нижнего. Этот процесс расширения рабочего тела близок к адиабатному.

В конце рабочего такта открывается выпускной клапан и рабочее тело соединяется с окружающей атмосферой. Выпуск отработанных газов сопровождается передачей количества теплоты Q_2 окружающему воздуху, выполняющему роль охладителя.

При длительной работе двигателя описанный цикл повторяется многократно. Но перед началом каждого цикла необходимо освободить цилиндр от продуктов сгорания, не содержащих кислорода, и произвести всасывание горючей смеси. Это осуществляется во время двух подготовительных тактов впуска и выпуска.

Для поршневых двигателей внутреннего сгорания важной характеристикой, определяющей полноту сгорания топлива и значительно влияющей на значение КПД, является степень сжатия горючей смеси: $\varepsilon = V_2/V_1$, где V_2 и V_1 — объёмы в начале и в конце сжатия. С увеличением степени сжатия воз-

растает начальная температура горючей смеси в конце такта сжатия, что способствует более полному её сгоранию. У современных карбюраторных двигателей степень сжатия обычно составляет 8—9. Дальнейшему увеличению степени сжатия препятствует самовоспламенение (детонация) горючей смеси, происходящее ещё до того, как поршень достигнет верхней мёртвой точки. Это явление оказывает разрушающее действие на двигатель и снижает его мощность и КПД. Достигнуть указанных степеней сжатия без детонации удалось путём увеличения скорости движения поршня при повышении числа оборотов двигателя до 5—6 тыс. об/мин и применения бензина со специальными антидетонационными присадками.

Двигатель Дизеля. Чтобы повысить КПД двигателя внутреннего сгорания, немецкий инженер Р. Дизель в 1892 г. предложил использовать ещё большие степени сжатия рабочего тела и расширение при постоянном давлении.

Высокая степень сжатия без детонации достигается в двигателе Дизеля за счёт того, что сжатию подвергается не горючая смесь, а воздух. По окончании процесса сжатия в цилиндр впрыскивается горючее. Для его зажигания не требуется никакого специального устройства, так как при высокой степени адиабатного сжатия воздуха его температура повышается до 600—700 °С. Горючее, впрыскиваемое с помощью топливного насоса через форсунку, воспламеняется при соприкосновении с раскалённым воздухом.

Подача топлива управляется особым регулятором, в результате чего процесс горения протекает не столь кратковременно, как в карбюраторном двигателе. Поэтому часть процесса расширения, пока осуществляется подача топлива, происходит изобарно, а затем адиабатно. При обратном движении поршня осуществляется выпуск.

Современные дизели имеют степень сжатия 16—21 и КПД около 40%.

Паровая турбина. Первая паровая турбина, нашедшая практическое применение, была изготовлена шведским инженером Г. Лавалем в 1889 г. Её мощность была меньше 4 кВт при частоте вращения ротора 500 об/с.

При конструировании паровой турбины надо решить две проблемы. Во-первых, следует добиться, чтобы внутренняя энергия пара в максимальной степени превращалась в кинетическую энергию струи, вырывающейся из сопла. Во-вторых, следует добиться, чтобы кинетическая энергия струи в максимальной степени передавалась лопаткам ротора турбины.

Для экономичной работы турбины требуются сверхзвуковые скорости вращения ротора. Но при таких скоростях ротор турбины разрушится силами инерции. Для разрешения этого противоречия приходится конструировать турбины, ротор которых вращается со скоростью, меньшей оптимальной. Чтобы полнее использовать кинетическую энергию струи пара, турбины делают многоступенчатыми, насаживая на общий вал несколько роторов возрастающего диаметра. Пар отдаёт часть своей кинетической энергии ротору меньшего диаметра, затем направляется на другой ротор большего диаметра, где отдаёт его лопаткам часть оставшейся кинетической энергии, и т. д. Отработавший пар конденсируется в охладителе-конденсаторе, а тёплая вода направляется в котёл.

КПД современных паровых турбин достигает 40%. Поэтому электрические генераторы всех тепловых и атомных электростанций приводятся в действие паровыми турбинами.

Так как температура пара, применяемого в современных паротурбинных установках, не превышает 580 °С, а температура пара на выходе из турбины обычно не ниже 30 °С, максимальный КПД паротурбинной установки как тепловой машины равен:

$$\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{853\ \text{К} - 303\ \text{К}}{853\ \text{К}} = 0{,}64,$$

а реальные значения КПД паротурбинных конденсационных электростанций достигают лишь 40%.

Газовые турбины. Газотурбинная установка состоит из воздушного компрессора *1*, камер сгорания *2*, газовой турбины *3* и выпускного сопла *4* (рис. 3.22). При работе турбины ротор компрессора вращается, засасывает воздух и повышает давление воздуха в 5—7 раз. Процесс сжатия протекает почти адиабатно, поэтому температура воздуха значительно повышается, достигая 200 °С и более.

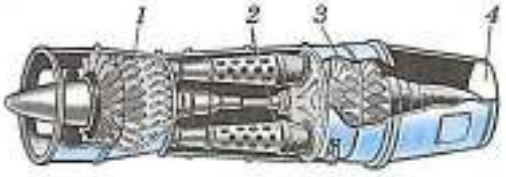


Рис. 3.22

Сжатый воздух поступает в камеру сгорания *2*. Одновременно через форсунку в неё впрыскивается под большим давлением жидкое топливо — керосин, мазут. При горении топлива воздух, служащий рабочим телом, нагревается до 1500—2200 °С. Нагревание воздуха происходит при постоянном давлении, поэтому воздух расширяется и скорость его движения увеличивается.

Движущиеся с большой скоростью воздух и продукты горения направляются в турбину 3. Переходя от ступени к ступени, они отдают свою кинетическую энергию лопаткам ротора турбины. Часть полученной турбиной энергии расходуется на вращение компрессора, а остальная используется, например, для вращения винта самолёта или ротора электрического генератора.

Цикл работы газовой турбины аналогичен циклу поршневого ДВС. Разница лишь в том, что в поршневом ДВС его четыре такта происходят последовательно во времени в одном месте — цилиндре, а в газовой турбине те же такты происходят одновременно в разных участках: всасывание и сжатие воздуха — в компрессоре, сжигание топлива — в камере сгорания, рабочий ход — в турбине и выпуск — в выпускном сопле.

КПД газотурбинных установок достигает 25—30%. У газотурбинных двигателей нет громоздких паровых котлов, как у паровых машин и паровых турбин, нет поршней и механизмов, преобразующих возвратно-поступательное движение во вращательное, как у паровых машин и двигателей внутреннего сгорания. Поэтому газотурбинный двигатель занимает втрое меньше места,

чем дизель той же мощности, а его удельная масса (отношение массы к мощности) в 6—9 раз меньше, чем у авиационного поршневого ДВС. Компактность и быстроходность в сочетании с большой мощностью на единицу массы определили первую практически важную область применения газотурбинных двигателей — авиацию.

Самолёты с винтом, насаженным на вал газотурбинного двигателя, появились в 1944 г. Турбовинтовые двигатели имеют такие известные самолёты, как Ил-18, Ан-22, Ан-124 «Руслан».

Турбореактивный двигатель. Газовая турбина может быть использована как реактивный двигатель. Воздух и продукты горения выбрасываются из газовой турбины с большой скоростью. Реактивная сила тяги, возникшая при этом, может быть использована для движения самолёта, теплохода или железнодорожного состава.

Основное отличие турбореактивного двигателя от турбовинтового заключается в том, что в нём газовая турбина используется только для приведения в действие воздушного компрессора и отнимает у газовой струи, выходящей из камеры сгорания, лишь небольшую часть энергии. В результате газовая струя имеет на выходе из сопла высокую скорость и создаёт реактивную силу тяги.

Успешное применение турбореактивных двигателей в авиации началось в 1940-х гг. созданием реактивных истребителей, а первый в нашей стране реактивный пассажирский самолёт Ту-104 вышел на линию Москва — Иркутск в 1956 г. Турбореактивными двигателями оборудованы самолёты Ил-62, Ту-154, Ил-86.

Ракетные двигатели. Реактивные двигатели, не использующие для своей работы окружающую среду, например воздух земной атмосферы, называют *ракетными двигателями*. Основные части ракетного двигателя — камера сгорания и сопло. В принципе для ракетного двигателя могут быть использованы различные источники энергии, но на практике пока применяют в основном химические. При сжигании горючего в камере сгорания химического ракетного двигателя образуются продукты горения в газообразном состоянии. Выход струи газа через сопло приводит к возникновению реактивной силы.

Конструкцию космической ракеты с жидкостным реактивным двигателем впервые предложил в 1903 г. основоположник космической науки К. Э. Циолковский (1857—1935).

Первая отечественная жидкостная ракета «ГИРД-09» была создана в 1933 г. по проекту советского инженера М. К. Тихонравова (1900—1974). Двигатель ракеты работал на жидком кислороде и бензине.

Дальнейшая успешная разработка ракетно-космической техники, выполненная под руководством академика С. П. Королёва (1906—1966), позволила осуществить в нашей стране запуск первого в мире искусственного спутника Земли (4 октября 1957 г.), полёт 12 апреля 1961 г. вокруг Земли первого в мире космонавта Ю. А. Гагарина (1934—1968), запуск межпланетных станций на Луну, Марс, Венеру. Жидкостные реактивные двигатели для этих космических ракет разработаны под руководством академика В. П. Глушко (1908—1989).

Мощность первой ступени ракеты-носителя «Восток» с ЖРД достигала 15 ГВт.

В 1987 г. прошла успешные испытания новая мощная универсальная ракета-носитель «Энергия». Она имеет стартовую массу свыше 2000 т, способна выводить на орбиту более 100 т полезного груза.

Тепловые двигатели. Двигатель внутреннего сгорания. Двигатель Дизеля. Паровая турбина

1. Почему паровые машины вытеснены двигателями внутреннего сгорания? 2. Как работает четырёхтактный двигатель внутреннего сгорания? 3. Для чего в цилиндр двигателя внутреннего сгорания впускается воздух? 4. По какому циклу работает дизельный двигатель? 5. В чём преимущество дизельного двигателя по сравнению с карбюраторным? 6. В чём преимущество паровой турбины над поршневым паровым двигателем? 7. Где применяют газовые турбины? 8. По какому циклу работает газовая турбина? 9. Какими преимуществами обладает газовая турбина по сравнению с паровой? 10. Как устроен ракетный двигатель? 11. Чем отличается турбореактивный двигатель от турбовинтового?

ЗАДАЧА 1. На рисунке 3.23 представлена диаграмма цикла, осуществлённого с одноатомным идеальным газом, взятым в количестве 0,2 моль. Участки BC и DA — адиабаты. Вычислите коэффициент полезного действия тепловой машины, работающей по этому циклу. Определите работу, совершённую газом на участке BC. Определите максимальный КПД тепловой машины с нагревателем и холодильником, если в точке B газ находился в тепловом равновесии с нагревателем, а в точке D — в тепловом равновесии с холодильником.

Решение. Так как участки BC и DA — адиабаты, то передача количества теплоты Q_1 от нагревателя осуществляется только при изохорном процессе AB, а передача количества теплоты Q_2 холодильнику — только при изохорном процессе CD.

При изохорных процессах работа равна нулю, поэтому из первого закона термодинамики следует: $Q_1 = \Delta U_1$ и $Q_2 = \Delta U_2$.

Изменение внутренней энергии ΔU одноатомного идеального газа при изохорном процессе

$$\Delta U = \frac{3}{2}\nu R\Delta T = \frac{3}{2}V\Delta p,$$

следовательно,

$$Q_1 = \frac{3}{2}V_A\Delta p_{AB},\ Q_2 = \frac{3}{2}V_C\Delta p_{CD}.$$

Работа A, совершённая за цикл, равна:

$$A = Q_1 - Q_2 = \frac{3}{2}(V_A\Delta p_{AB} - V_C\Delta p_{CD}).$$

КПД цикла

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{V_A\Delta p_{AB} - V_C\Delta p_{CD}}{V_A\Delta p_{AB}} = 1 - \frac{V_C\Delta p_{CD}}{V_A\Delta p_{AB}}.$$

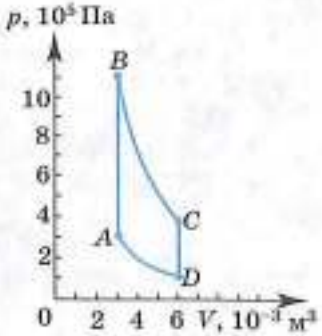


Рис. 3.23

Подставив данные величин из диаграммы на рисунке 3.23, получим

$$\eta = 1 - \frac{6 \cdot 10^{-3} \cdot 2{,}5 \cdot 10^5}{3 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^5} = 1 - \frac{5}{8} = \frac{3}{8} = 0{,}375.$$

Работа газа при адиабатном расширении из состояния B в состояние C равна изменению внутренней энергии газа, взятому с противоположным знаком: $A_{BC} = -\Delta U_{BC} = \frac{3}{2}\nu R(T_B - T_C)$.

Используя уравнение состояния идеального газа, находим значения температуры в точках B, C и D:

$$T_B = \frac{p_B V_B}{\nu R} = \frac{11 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{0{,}2 \cdot 8{,}31}\,(\text{К}) = 1986\ \text{К};$$

$$T_C = \frac{p_C V_C}{\nu R} = \frac{3{,}5 \cdot 10^5 \cdot 6 \cdot 10^{-3}}{0{,}2 \cdot 8{,}31}\,(\text{К}) = 1263\ \text{К};$$

$$T_D = \frac{p_D V_D}{\nu R} = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 6 \cdot 10^{-3}}{0{,}2 \cdot 8{,}31}\,(\text{К}) = 361\ \text{К}.$$

Работа на участке BC: $A_{BC} = \frac{3}{2}\nu R(T_B - T_C) = \frac{3}{2} \cdot 0{,}2 \cdot 8{,}31 \cdot 723$ (Дж) = = 1802 Дж = 1,8 кДж.

Максимальный КПД тепловой машины

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_2} = \frac{T_B - T_D}{T_B} = \frac{1986 - 361}{1986} = 0{,}82.$$

Как видно, КПД исследуемого цикла в 2,2 раза меньше КПД цикла Карно, работающего в том же температурном интервале.

ЗАДАЧА 2. Космический корабль массой 4,0 т двигался вокруг Земли по круговой орбите на высоте $h_1 = 200$ км от её поверхности. В результате включения на короткое время Δt ракетного двигателя скорость космического корабля увеличилась на $\Delta v = 10\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, а траектория движения стала эллипсом с минимальным удалением от поверхности Земли $h_1 = 200$ км и максимальным удалением от поверхности Земли $h_2 = 234$ км. С какой скоростью v_2 движется космический корабль в точке максимального удаления от поверхности Земли? Чему равны сила тяги F ракетного двигателя, время Δt его работы, масса Δm израсходованного топлива? Изменение массы космического корабля не учитывайте. Масса Земли и её радиус соответственно равны $M = 6 \cdot 10^{24}$ кг и $R = 6370$ км, гравитационная постоянная $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$, секундный расход топлива $\mu = \frac{\Delta m}{\Delta t} = 1\ \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, скорость истечения газов $v = 4{,}0 \cdot 10^3\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, удельная теплота сгорания горючего и окислителя $q = 1{,}2 \cdot 10^7\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

Решение. Скорость v_1 космического корабля в точке минимального удаления от поверхности Земли после его ускорения $v_1 = v_0 + \Delta v$. Скорость v_0 дви-

жения по круговой орбите можно найти из уравнения $\frac{mv_0^2}{R_1} = G\frac{Mm}{R_1^2}$, где $R_1 = R + h_1 = 6{,}57 \cdot 10^6$ м, отсюда

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R_1}} = \sqrt{\frac{6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot 6 \cdot 10^{24}}{6{,}57 \cdot 10^6}} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right) = 7{,}805 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Следовательно, на минимальном удалении от Земли скорость ракеты $v_1 = 7{,}805 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}} + 10 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 7{,}815 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

По закону сохранения момента импульса для космического корабля выполняется равенство $mv_1R_1 = mv_2R_2$, где $R_2 = R + h_2 = 6{,}604 \cdot 10^6$ м. Поэтому скорость v_2 в точке максимального удаления

$$v_2 = \frac{7{,}815 \cdot 10^3 \cdot 6{,}570 \cdot 10^6}{6{,}604 \cdot 10^6} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right) = 7{,}775 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Силу тяги F ракетного двигателя найдём из уравнения $F\Delta t = \Delta m v$, где Δm — масса газов, выброшенных ракетным двигателем за время Δt; v — скорость истечения газовой струи. Перепишем это уравнение в виде

$$F = \frac{\Delta m}{\Delta t} v = \mu v = 1 \cdot 4{,}0 \cdot 10^3 \text{ (Н)} = 4 \text{ кН}.$$

Время работы двигателя можно найти по изменению импульса космического корабля: $F\Delta t = m\Delta v$, где m — масса космического корабля; Δv — изменение его скорости. Итак,

$$\Delta t = \frac{m\Delta v}{F} = \frac{4{,}0 \cdot 10^3 \cdot 10}{4{,}0 \cdot 10^3} \text{(с)} = 10 \text{ с}.$$

Массу Δm израсходованного топлива и окислителя можно найти по закону сохранения импульса для системы корабль—горючее: $m\Delta v = \Delta m v$, откуда

$$\Delta m = \frac{m\Delta v}{v} = \frac{4{,}0 \cdot 10^3 \cdot 10}{4{,}0 \cdot 10^3} \text{(кг)} = 10 \text{ кг}.$$

Коэффициент полезного действия ракетного двигателя определяется выражением $\eta = \frac{N}{Q_c}$, где N — мощность двигателя; Q_c — количество теплоты, ежесекундно выделяющейся при сжигании топлива.

Так как $N = \frac{\mu v^2}{2}$, а $Q_c = \mu q$, то КПД ракеты

$$\eta = \frac{v^2}{2q} = \frac{16 \cdot 10^6}{21{,}2 \cdot 10^7} = 0{,}67.$$

РЕШИТЕ 41.1. Карбюраторный двигатель внутреннего сгорания работает по циклу (рис. 3.24), состоящему из двух адиабат (*1,2*; *3,4*) и двух изохор (*2,3*; *1,4*). Рассчитайте КПД двигателя при следующих значениях температур: $T_1 = 300$ К, $T_2 = 524$ К, $T_3 = 786$ К, $T_4 = 450$ К.

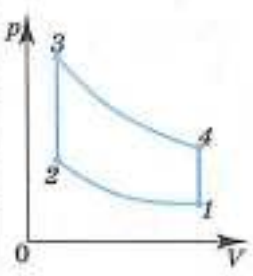


Рис. 3.24

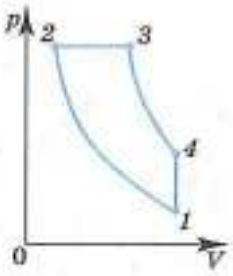


Рис. 3.25

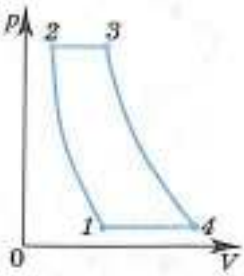


Рис. 3.26

41.2. Дизельный двигатель внутреннего сгорания работает по циклу (рис. 3.25), состоящему из двух адиабат (*1,2*; *3,4*), одной изобары (*2,3*) и одной изохоры (*1,4*). Рассчитайте КПД такого двигателя, если отношение удельных теплоёмкостей при постоянном давлении и постоянном объёме $\gamma = \frac{c_p}{c_V} = 1{,}4$, а температуры газа имеют значения $T_1 = 300$ К, $T_2 = 750$ К, $T_3 = 1200$ К, $T_4 = 600$ К.

41.3. Газотурбинная установка работает по циклу (рис. 3.26), состоящему из двух адиабат (*1,2*; *3,4*) и двух изобар. Рассчитайте КПД такого двигателя, если температуры газа $T_1 = 300$ К, $T_2 = 900$ К, $T_3 = 1800$ К.

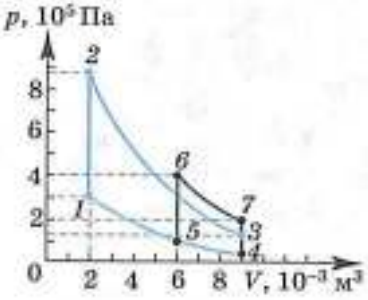


Рис. 3.27

Указание: для нахождения T_4 воспользуйтесь формулой Пуассона для адиабатного процесса. Газ одноатомный.

41.4*. На рисунке 3.27 приведены диаграммы двух циклов (*1, 2, 3, 4, 1* и *5, 6, 7, 4, 5*), каждый из которых состоит из двух изохор и двух адиабат. При работе по какому из этих двух циклов двигатель имеет более высокий КПД? Газ одноатомный.

Принципы устройства двигателей разного типа. Их сравнение.

§ 42. Холодильные машины

Повторите: циклические процессы.

Холодильник. Принцип действия холодильника заключается в том, что от более холодного тела, находящегося в морозильнике, отнимается некоторое количество теплоты и передаётся более нагретому телу. Этим более нагретым телом является воздух в комнате, который в результате работы холодильника нагревается до ещё более высокой температуры.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Холодильник работает в полном соответствии со вторым законом термодинамики. Холодильник и воздух комнаты не составляют замкнутую систему. Холодильник подключён к электрической сети, а работу совершает его электродвигатель. Следовательно, переход тепла от холодного тела к горячему не является единственным результатом работы холодильника, так как за счёт работы электродвигателя этот процесс сопровождается превращением энергии электрического тока во внутреннюю энергию.

Рабочим телом в компрессионном холодильнике (рис. 3.28) служит жидкость, имеющая низкую температуру кипения, которой заполнена система конденсатора и испарителя. Компрессор, приводимый в действие электродвигателем, откачивает пары этой жидкости из испарителя и нагнетает их в конденсатор. При сжатии газ нагревается. Охлаждение его до комнатной температуры происходит в конденсаторе, расположенном обычно на задней стенке холодильного шкафа. Охлаждённый до комнатной температуры при повышенном давлении, создаваемом в конденсаторе с помощью компрессора, газ переходит в жидкое состояние. Из конденсатора жидкость через капиллярную трубку поступает в испаритель. Откачка паров из испарителя с помощью компрессора поддерживает в нём пониженное давление. При пониженном давлении в испарителе жидкость кипит и испаряется даже при температуре ниже 0 °С. Энергия на испарение жидкости отбирается от стенок испарителя, вызывая их охлаждение. Откачанные пары поступают в кожух компрессора, оттуда снова в конденсатор и т. д., по замкнутому кругу.



Рис. 3.28

Самая низкая температура, которая может быть получена в испарителе (морозильной камере), определяется значением давления паров, так как температура кипения жидкости понижается с уменьшением давления. При постоянной скорости поступления жидкости из конденсатора в испаритель через капиллярную трубку давление паров в испарителе будет тем ниже, чем дольше работает компрессор. Если нет необходимости добиваться понижения температуры в испарителе до предельно достижимого значения, то компрессор

периодически останавливается путём выключения электромотора, приводящего его в действие. Компрессор включается автоматом, следящим за поддержанием в холодильном шкафу заданной температуры.

Рабочий цикл холодильной машины. В обратных процессах (циклах) холодильником по-прежнему называют тело с более низкой температурой, хотя теперь оно отдаёт тепло, а нагревателем — тело, имеющее более высокую температуру, хотя теперь оно его получает. При этом рабочее тело получает за один цикл от холодильника количество теплоты Q_2, отдавая нагревателю количество теплоты Q_1, которое больше полученного количества теплоты Q_2 на работу A', совершаемую электромотором: $|Q_1| = Q_2 + A'$. Можно сказать, что в данном случае тепловая машина совершает отрицательную работу: $A = Q_2 - |Q_1| = -A'$.

В результате проведения обратного цикла увеличивается разность температур между нагревателем и холодильником. В этих условиях тепловая машина работает как тепловой насос.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Важнейшей характеристикой холодильной машины является *холодильный коэффициент*, равный отношению количества теплоты, отданной холодильной камерой, к работе электродвигателя (расходу электроэнергии):

$$\zeta = \frac{Q_2}{A'} = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2}.$$

В идеальной холодильной машине максимальный холодильный коэффициент $\zeta_{max} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$, в реальной машине — $\zeta_p < \frac{T_2}{T_1 - T_2}$.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Ещё одна характеристика холодильной машины — *холодопроизводительность*. Она показывает, какое количество теплоты q способна отнимать машина у охлаждаемых тел в единицу времени: $q = \frac{Q_2}{t}$.

Холодильная машина как тепловой насос. Нельзя ли использовать холодильную машину для обогрева помещения?

Чтобы ответить на этот вопрос, найдём соотношение между количеством теплоты Q_2, отнятой у холодного тела, и количеством теплоты Q_1, переданной нагретому телу.

Поскольку в обратном цикле сжатие газа происходит при более высокой температуре, чем расширение, то работа сжатия больше работы расширения ($|A'_{сж}| > |A'_{расш}|$). Таким образом, за каждый обратный цикл внешние силы совершают положительную работу:

$$A' = |A'_{сж}| - |A'_{расш}| > 0.$$

Применив первый закон термодинамики к этим изотермическим процессам, найдём: $Q_1 = |A'_{сж}|$; $Q_2 = |A'_{расш}|$, следовательно, $Q_1 = Q_2 + A' > Q_2$.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Согласно первому закону термодинамики мы получили, что за счёт работы A' компрессора холодильник отдаёт в окружающее пространство большее количество теплоты, чем то, которое он отнимает у морозильной камеры.

ЗАПОМНИТЕ Если холодильную камеру вынести на улицу, а конденсатор оставить в помещении, то при совершении компрессором работы A' за счёт энергии электрической сети от холодного воздуха на улице будет отнято количество теплоты Q_2 и тёплому воздуху в комнате будет передано количество теплоты $|Q_1| = Q_2 + A'$. Холодильную машину, работающую по такому принципу, называют **тепловым насосом**.

Так можно использовать холодильную машину для обогрева помещения.

Ответим теперь на вопрос: выгодно ли пользоваться тепловым насосом? Коэффициент полезного действия электронагревателя можно считать равным единице.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Эффективность теплового насоса характеризуется *отопительным коэффициентом*, равным отношению количества теплоты, которую получает отапливаемое помещение, к работе электродвигателя (расходу электроэнергии): $\psi_{max} = \frac{|Q_1|}{A'} = \frac{|Q_1|}{|Q_1| - Q_2} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} > 1$.

У реального теплового насоса $\psi_р < \frac{T_1}{T_1 - T_2}$.

Но и в этом случае добиваются, чтобы выполнялось условие $\psi_р > 1$, иначе теряет смысл сама идея теплового насоса как более экономичной отопительной системы.

В качестве примера рассмотрим случай, когда температура наружного воздуха $t_2 = 0$ °C, а внутри дома тепловой насос должен поддерживать температуру $t_1 = +20$ °C. Для этих значений температур максимальный отопительный коэффициент равен $\psi_{max} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{293\text{ К}}{293\text{ К} - 273\text{ К}} = 14{,}5$.

Это значит, что, пользуясь тепловым насосом, работающим за счёт электрической энергии двигателя, мы можем «накачать» в помещение примерно в 15 раз большее количество теплоты, чем получили бы при той же затрате энергии от электронагревательного прибора.

Холодильная машина. Холодильный коэффициент. Тепловой насос. Отопительный коэффициент

1. Опровергает ли работа холодильника второй закон термодинамики? 2. Как устроен холодильник и каков принцип его действия? 3. Что такое тепловой насос? 4. Выполняются ли первый и второй законы термодинамики при работе теплового насоса?

Понаблюдайте за работой холодильника. Выясните, есть ли у него нагретые части. Почему холодильник периодически издаёт шум?

Принцип действия и устройство бытового холодильника.

§ 43. Тепловые машины и охрана природы

Повторите: тепловые машины.

Влияние тепловых двигателей на окружающую среду. В настоящее время количество ежегодно сжигаемого в различных тепловых машинах химического топлива настолько велико, что всё более сложной проблемой становится охрана природы от вредного влияния продуктов сгорания.

Отрицательное влияние тепловых машин на окружающую среду связано с действием различных факторов.

Во-первых, при сжигании топлива используется кислород из атмосферы, вследствие чего содержание кислорода в воздухе постепенно уменьшается.

Во-вторых, сжигание топлива сопровождается выделением в атмосферу углекислого газа.

Молекулы оксида углерода способны поглощать инфракрасное излучение. Поэтому увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере изменяет её прозрачность.

Инфракрасное излучение, испускаемое земной поверхностью, всё в большей мере поглощается в атмосфере. Дальнейшее существенное увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере может привести к повышению её температуры (парниковый эффект).

В-третьих, при сжигании угля и нефти атмосфера загрязняется азотными и серными соединениями, вредными для здоровья человека. Особенно существенно это загрязнение в крупных городах и промышленных центрах.

Более половины всех загрязнений атмосферы создаёт транспорт. Кроме оксида углерода и соединений азота, автомобильные двигатели ежегодно выбрасывают в атмосферу 2—3 млн т свинца. (Соединения свинца добавляют в автомобильный бензин для предотвращения детонации топлива в двигателе, приводящей к снижению мощности двигателя и его быстрому износу.) Так как загрязнение атмосферы в городах происходит в основном вследствие работы автомобильных двигателей, проблема их усовершенствования представляет одну из наиболее актуальных научно-технических задач.

Один из путей уменьшения загрязнения окружающей среды — использование дизелей вместо карбюраторных бензиновых двигателей, так как в топливо дизелей не добавляют соединения свинца.

Перспективными являются разработки и испытания автомобилей, в которых вместо бензиновых двигателей применяются электрические двигатели, питающиеся от аккумуляторов, или двигатели, использующие в качестве топлива водород. В последнем типе двигателя при сгорании водорода образуется вода. Однако здесь возникает масса технических проблем, не решённых до сих пор.

Использование твёрдого топлива. Запасы нефти и газа, на которые последние десятилетия ориентировалась теплоэнергетика, ограниченны. Развитие теплоэнергетики связывается в основном с использованием твёрдого топлива, в первую очередь угля, так как разведанные запасы нефти и газа

существенно меньше угольных. В ряде случаев добыча угля обходится намного дешевле добычи нефти.

Но при использовании твёрдого топлива приходится решать целый ряд проблем. Горение твёрдого топлива намного сложнее горения газообразного или жидкого топлива.

В топке котлоагрегата, сжигающего уголь, одновременно происходит несколько процессов. Энергоблок на угле мощностью 500—800 МВт вырабатывает около 2000 т пара в час, сжигая около 200 т калорийного угля. В низкокачественных топливах негорючая часть составляет около 50% объёма, поэтому требуется около 400 т угля для часовой работы такой турбины. Негорючая часть топлива превращается в шлак.

Вопросы охраны окружающей среды становятся всё более определяющими для дальнейшего развития теплоэнергетики. С этой точки зрения тепловые электростанции, работающие на угле, далеко не совершенны прежде всего из-за большого количества оксидов серы в газах, выходящих с электростанции. Если эти газы пропустить через специальные устройства — скрубберы, в которых сера связывается известью, то концентрация оксида серы существенно уменьшится.

Ещё один метод, достаточно чистый с точки зрения экологии, — сжигание угля в кипящем слое. В этом случае зола не плавится, так как горение идёт при более низкой температуре, чем в факеле. Если в кипящий слой добавить известняк, то он погасит оксид серы.

Перегрев окружающей среды. Выбросы вредных веществ в атмосферу не единственная сторона воздействия энергетики на природу. Различные стадии преобразования энергии органического топлива в электрическую сопровождаются выделением энергии в окружающую среду. Если тепловые сбросы мощной теплоэлектростанции передать проточной воде, то её температура повысится примерно на 5 °С. Такое воздействие на гидросферу нельзя допустить: оно приведёт к изменению теплового режима в реках. Поэтому рядом с теплоэлектростанциями располагаются пруды-охладители площадью 10—20 км^2, изолированные от рек и озёр.

При переработке угля всё шире применяется метод подземной газификации углей, дающий высококалорийный газ и жидкие углеводороды, которые используются также как топливо или как сырьё для органического синтеза.

Более половины возможностей экономии топливно-энергетических ресурсов даёт автотранспорт. Если дизельными двигателями, которые примерно на треть экономичнее карбюраторных, оборудовать 65% грузовых и хотя бы 20% легковых автомобилей, то суммарный расход топлива сократится на 10 млн т в год.

Повышение КПД установок. Важнейшая характеристика энергетических установок — их коэффициент полезного действия. Максимальный КПД тепловой электростанции не превышает 40—42%, а у других теплоустановок он ещё ниже: у лучших карбюраторных двигателей внутреннего сгорания около 30%, у дизельных около 40%.

Столь низкий КПД теплоэнергетики связан с целым рядом причин. Одна из главных — отсутствие жаропрочных материалов, способных выдерживать в течение долгого времени высокие давления и температуры.

Возможно, что будущее тепловой энергетики связано с комбинированными установками, в которых паровая турбина работает совместно с газовой. Горячие газы, имеющие температуру до 1200 °С, подаются в газовую турбину. Затем несколько остывшие, но имеющие ещё температуру 500—600 °С газы подаются в парогенератор паровой турбины. Далее работа осуществляется как в обычной паровой турбине.

Такое совместное использование газа и пара позволит повысить КПД комбинированной установки до 48%.

Окружающая среда. Парниковый эффект. Перегрев окружающей среды

1. К каким отрицательным последствиям для окружающей среды приводит широкое использование тепловых машин в энергетике и на транспорте? 2. Каковы пути уменьшения отрицательного влияния тепловых машин на окружающую среду?

1. Наиболее вредные для окружающей среды тепловые машины.
2. Глобальное потепление климата. Его причины и последствия.

В настоящее время проблема глобального потепления является весьма актуальной и обсуждаемой в самых разных изданиях. В них довольно часто синонимом глобального потепления авторы употребляют словосочетание «парниковый эффект», но между этими понятиями есть небольшая разница.

1. Дайте определения парникового эффекта и глобального потепления.

2. Попробуйте сформулировать, в чём же разница между обсуждаемыми понятиями.

3. Какое из этих понятий является более широким.

4. Перечислите современные способы получения информации о климатических изменениях.

5. Существуют различные гипотезы по поводу причин глобального потепления. Перечислите некоторые из них (попробуйте в защиту той или иной гипотезы привести доступные вам научные факты).

6. Существует ряд сценариев по поводу дальнейших глобальных климатических изменений. Обсудите некоторые из них с учащимися вашего класса. Выберите тот сценарий, который вам кажется наиболее убедительным, приведите обоснование своей точки зрения.

ОТВЕТЬТЕ НА ИТОГОВЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ

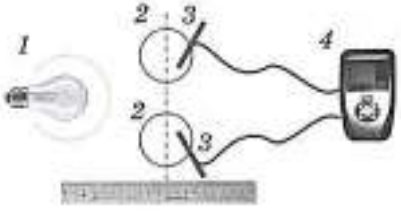
1. Сформулируйте закон сохранения энергии в термодинамике.
2. Сформулируйте закон, определяющий направление процессов.
3. Приведите примеры применения первого закона термодинамики для описания процессов, протекающих в природе.
4. Перечислите три способа обмена энергией в термодинамике без совершения работы.
5. Объясните с позиции термодинамики, какие способы обмена энергией с окружающей средой являются для человека преобладающими при температуре окружающей среды, близкой к 0 °С, 36 °С и выше 36 °С.

1. Исследуйте зависимость температуры кипения воды от атмосферного давления.

Налейте в алюминиевый стаканчик от школьного калориметра воду. Поместите в воду термометр и поставьте стаканчик на электрическую плитку. Определите температуру кипения воды. Запишите значение атмосферного давления в день эксперимента. Проведите этот эксперимент в другие дни, отмечая значения атмосферного давления. Всегда ли одинаковой окажется температура кипения? Установите зависимость температуры кипения от внешнего давления. Сделайте вывод.

2. Проведите эксперимент по исследованию парникового эффекта (см. рис.).

Расположите лампу накаливания на высоте примерно 5 см над поверхностью стола. На равном расстоянии от лампы (10–15 см) расположите два лабораторных стакана, на дне которых должен быть слой земли в 1 см толщиной.



В стаканы опустите датчики (или термометры), прикреплённые с помощью изоляционной ленты к линейкам, как это показано на рисунке. Конец датчика должен находиться в 3 см от конца линейки, изоляционная лента не должна накрывать конец датчика. Проверьте, чтобы показания температуры обоих датчиков (или термометров) совпадали.

Накройте плёнкой стаканы.

Сделайте глубокий вдох и задержите дыхание как можно дольше. Приоткрыв плёнку одного из стаканов и не прикасаясь губами к нему, выдохните в него воздух и снова закройте плёнкой.



Включите лампу примерно на 20 мин. Через каждые 5 мин фиксируйте температуру в каждом из стаканов. Постройте графики зависимости температуры от времени для каждого стакана. Сравните полученные зависимости. Сделайте вывод.

3. Вечный двигатель. Первое и второе начала термодинамики. Классификация вечных двигателей. Неудачные конструкции вечных двигателей из истории. Ваше отношение к проблеме вечных двигателей.

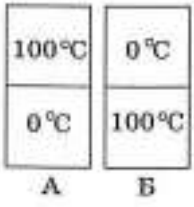
4. Двигатели. Классификации двигателей. Двигатели внешнего сгорания: паровая машина, паровая турбина, двигатель Стирлинга. Двигатели внутреннего сгорания: поршневой двигатель, карбюраторный двигатель, дизельный двигатель. Газотурбинный двигатель. Турбореактивный двигатель. Турбовинтовой двигатель. Реактивные двигатели.

5. Экологические проблемы тепловой энергетики. Тепловые электростанции и их типы. Виды топлива. Загрязнение атмосферы и гидросферы. Пути решения экологических

проблем. Новые технологии. Ваши предложения по возможным действиям в целях сохранения окружающей среды.

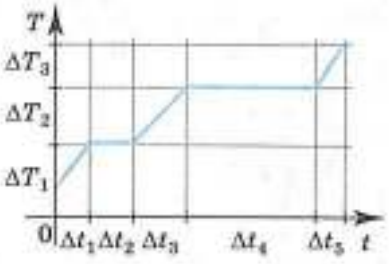
ЕГЭ **А1.** Тепловой контакт двух сосудов с газами при разных температурах осуществляется способом *А* и способом *Б* (см. рис.). Если теплообмен возможен только между сосудами, то средняя кинетическая энергия молекул в верхнем сосуде

1) увеличивается только в случае *А*
2) увеличивается только в случае *Б*
3) увеличивается в обоих случаях
4) не увеличивается ни в одном из случаев



А2. На рисунке представлен график зависимости абсолютной температуры T воды массой m от времени t при осуществлении теплопередачи с постоянной мощностью P. В момент времени $t = 0$ вода находится в твёрдом состоянии. Какое из приведённых ниже выражений определяет удельную теплоёмкость воды в жидком состоянии по результатам этого опыта?

1) $\frac{P\Delta t_3}{m\Delta T_3}$ 2) $\frac{P\Delta t_2}{m}$ 3) $\frac{P\Delta t_3}{m\Delta T_2}$ 4) $\frac{P\Delta t_4}{m}$



А3. Теплопередача всегда происходит от тела с большей

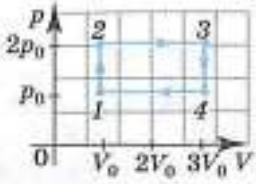
1) массой к телу с меньшей массой
2) теплоёмкостью к телу с меньшей теплоёмкостью
3) температурой к телу с меньшей температурой
4) теплопроводностью к телу с меньшей теплопроводностью



С4. В калориметре нагревается лёд массой $m = 200$ г. На рисунке представлен график зависимости температуры льда от времени. Пренебрегая теплоёмкостью калориметра и тепловыми потерями, определите удельную теплоту плавления льда из рассмотрения процессов нагревания льда и воды (теплоёмкость льда $c_1 = 2100$ Дж/(кг · К), теплоёмкость воды $c_2 = 4200$ Дж/(кг · К).



С5. Идеальный одноатомный газ сжимается сначала адиабатно, а затем изобарно. Конечная температура газа равна начальной (см. рис.). При адиабатном сжатии газа внешние силы совершили работу, равную 6 кДж. Чему равна работа внешних сил за весь процесс *1—2—3*?



С6. Рабочим телом тепловой машины является гелий, который в ходе работы меняет своё состояние циклически, как показано на рисунке. Чему равен КПД такой тепловой машины?

Раздел III. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

При изучении механических и тепловых явлений рассматривались законы, управляющие этими явлениями, обсуждались модели внутреннего строения тел, объясняющие механические и тепловые свойства тел. Однако не были выяснены очень важные вопросы: какова природа сил молекулярного взаимодействия? Какова природа сил упругости, возникающих при деформации тел?

Не все явления в природе можно понять и объяснить с помощью законов механики, молекулярно-кинетической теории строения вещества и термодинамики. В молекулярной физике использовались представления о силах притяжения и отталкивания между атомами и молекулами, но не выяснялась природа межатомных и межмолекулярных сил. Взаимодействия атомов и молекул, взаимодействия частиц внутри атомов объясняются на основе представлений о том, что в природе существуют *электрические заряды* и *электромагнитное поле*.

ЗАПОМНИТЕ Законы взаимодействия электрических зарядов, действия на них электромагнитных полей изучает раздел физики, называемый **электродинамикой**.

Глава 4. Электрическое поле

§ 44. Закон сохранения электрического заряда

Повторите: взаимодействие, сила, закон сохранения, изолированная система, замкнутая система.

Электрические заряды. Повседневным явлением, в котором обнаруживается факт существования в природе электрических зарядов, является процесс *электризации тел* при соприкосновении. Для изучения явлений электризации проведём следующие опыты.

Отрежем полоску бумаги шириной около 1 см. Поднеся к полоске какой-нибудь пластмассовый предмет, например ручку, убедимся, что они не взаимодействуют друг с другом. Положив полоску на тетрадь, проведём по ней несколько раз с лёгким нажимом пластмассовой ручкой. Затем возьмём полоску

бумаги в одну руку, а ручку в другую и будем их сближать. Бумажная полоска изгибается в сторону ручки, т. е. между бумажной полоской и ручкой возникают силы притяжения.

Очевидно, что наблюдаемые в опыте силы притяжения между бумажной полоской и пластмассовой ручкой не являются силами всемирного тяготения, так как возникают только после соприкосновения тел и не зависят от их масс.

ЗАПОМНИТЕ Взаимодействие тел, возникающее только после их соприкосновения и не зависящее от их масс, называется **электростатическим взаимодействием.**

Электростатическое взаимодействие тел объясняется существованием электрических зарядов.

ЗАПОМНИТЕ Процесс возникновения электрических зарядов на телах при соприкосновении (а также при некоторых других процессах, которые будут рассмотрены ниже) называется **электризацией** тел.

Два вида электрических зарядов. Продолжим опыты по изучению взаимодействия электрических зарядов. Отрежем две полоски бумаги шириной около 1 см. Сближая полоски, убеждаемся, что между ними нет заметных сил взаимодействия. Положив полоски рядом на тетрадь, проведём по ним с лёгким нажимом пластмассовой ручкой несколько раз. Чтобы полоски не изгибались, перевернём их и столько же раз проведём ручкой по другой стороне полосок.



Рис. 4.1

Взяв полоски, станем сближать их. Опыт показывает, что при сближении полоски изгибаются, отталкиваясь друг от друга (рис. 4.1). Следовательно, в отличие от сил всемирного тяготения, которые всегда являются силами притяжения, при электростатическом взаимодействии электрических зарядов могут наблюдаться как силы притяжения, так и силы отталкивания.

Способность электрических зарядов в одних случаях к взаимному притяжению, в других — к отталкиванию объясняется существованием двух различных видов зарядов. Один из них назвали положительным, а другой — отрицательным. Заряды обозначают буквой q или Q.

Очевидно, что при соприкосновении с одной и той же пластмассовой ручкой на обеих одинаковых полосках бумаги появляются электрические заряды одного знака. Эти полоски отталкиваются.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Между электрическими зарядами одинакового знака действуют силы отталкивания. Между электрическими зарядами противоположных знаков действуют силы притяжения.

Электрометр. Для обнаружения и измерения электрических зарядов применяется *электрометр*. Электрометр состоит из металлического стержня и стрелки, которая может вращаться вокруг горизонтальной оси. Стержень со

стрелкой закреплён в плексигласовой втулке и помещён в металлический корпус цилиндрической формы, закрытый стеклянными крышками.



Рис. 4.2

Натиранием о мех или бумагу сообщим заряд эбонитовой палочке, а затем прикоснёмся палочкой к стержню электрометра. Мы увидим, что стрелка электрометра отклоняется на некоторый угол (рис. 4.2). Поворот стрелки объясняется тем, что при соприкосновении заряженного тела со стержнем электрометра электрические заряды распределяются по стрелке и стержню. Силы отталкивания, действующие между одноимёнными электрическими зарядами на стержне и стрелке, вызывают поворот стрелки. Наэлектризуем эбонитовую палочку ещё раз и вновь коснёмся ею стержня электрометра. Опыт показывает, что при увеличении электрического заряда на стержне угол отклонения стрелки от вертикального положения увеличивается. Следовательно, по углу отклонения стрелки электрометра можно судить о значении электрического заряда, переданного стержню электрометра.

Закон сохранения электрического заряда. Воспроизведём теперь опыты, результаты которых в своё время послужили основой для создания современного учения об электричестве.

ЗАПОМНИТЕ Опыты, результаты которых лежат в основе построения теории, называют **фундаментальными**.

Установим на демонстрационном столе два одинаковых электрометра. На стержне одного из них укрепим металлический диск и поставим на него такой же диск с ручкой из изолятора. Между дисками поместим прослойку из сукна. Взявшись за ручку, совершим несколько движений верхним диском по сукну и поднимем верхний диск.

После удаления верхнего диска стрелка электрометра отклоняется, обнаруживая появление электрического заряда на диске и стержне электрометра (рис. 4.3). Прикоснёмся верхним диском к стержню второго электрометра. Опыт показывает, что стрелка второго электрометра после прикосновения отклоняется примерно на такой же угол, что и стрелка первого электрометра (рис. 4.4). Это значит, что в результате электризации при соприкосновении электрические заряды появились на двух соприкасающихся телах — на первом диске с сукном и на втором диске.



Рис. 4.3



Рис. 4.4

Теперь выполним последнюю часть опыта — соединим проводником стержни первого и второго электрометров. При этом стрелки первого и второго электрометров возвращаются в вертикальное положение (рис. 4.5). Наблюдаемая в опыте взаимная нейтрализа-



Рис. 4.5

ция электрических зарядов показывает, что суммарный электрический заряд на двух дисках равен нулю.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Опыты с применением самых точных приборов для измерения электрических зарядов показали, что в результате электризации тел при соприкосновении на них всегда возникают электрические заряды, равные по модулю и противоположные по знаку.

Электрические заряды могут появляться на телах не только в результате электризации при соприкосновении тел, но и при других взаимодействиях, например под воздействием света. Однако экспериментально установлено, что внутри изолированной системы при любых взаимодействиях алгебраическая сумма электрических зарядов остаётся постоянной.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЗАРЯДА В изолированной системе алгебраическая сумма электрических зарядов остаётся постоянной:

$$q_1 + q_2 + \ldots + q_n = \text{const}.$$

ЗАПОМНИТЕ **Изолированной** (или **замкнутой**) **системой** называют систему тел, в которую не вводятся извне и не выводятся из неё электрические заряды.

Нигде и никогда в природе не возникает и не исчезает электрический заряд одного знака. Появление положительного электрического заряда всегда сопровождается появлением равного по модулю отрицательного заряда. Ни положительный, ни отрицательный заряд не могут исчезнуть в отдельности, они могут лишь взаимно нейтрализовать друг друга, если равны по модулю.

Электрические заряды и строение вещества. Опыт показывает, что нейтральные атомы и молекулы любого химического вещества могут стать заряженными частицами — положительными или отрицательными ионами. Следовательно, электрическими зарядами обладают частицы, из которых состоят атомы и молекулы.

Как известно, в состав любого атома входят положительно заряженное ядро и отрицательно заряженные электроны.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ В нейтральном атоме суммарный заряд электронов в точности равен заряду атомного ядра. Тело, состоящее из нейтральных атомов и молекул, имеет суммарный электрический заряд, равный нулю.

Если в результате какого-либо взаимодействия часть электронов переходит от одного тела к другому, то одно тело приобретает отрицательный электрический заряд, а другое — равный по модулю положительный электрический заряд. При соприкосновении двух разноимённо заряжённых тел избыточное число электронов переходит с отрицательно заряженного тела к телу, у которого часть атомов не имела полный комплект электронов на своих оболочках.

Электрический заряд. Электризация. Электроскоп. Электрометр. Закон сохранения заряда. Изолированная система

1. Чем объясняется электризация тел при соприкосновении? 2. Какие опыты доказывают существование двух видов электрического заряда? 3. Каков принцип действия электрометра? 4. Какие частицы являются носителями отрицательных и положительных зарядов? 5. Как формулируется закон сохранения электрического заряда?

РЕШИТЕ

44.1. Со стержня электрометра сняли заряд $+q$, затем ему передали заряд $-q$. Каким стал электрический заряд на стержне?

44.2. Капля дождя, несущая положительный электрический заряд $+2q$, соединилась с каплей дождя, несущей отрицательный электрический заряд $-3q$. Каким стал общий заряд капли?

Выполните опыт по электризации тел при соприкосновении. Понаблюдайте отталкивание одноимённо заряженных тел и притяжение разноимённо заряженных тел.

1. Возьмите лёгкую тонкую бумагу, измельчите её (кусочки должны иметь размер примерно 2 мм). Поднесите к ним заряженное тело (заряд приобретает, например, расчёска, потёртая о волосы или о шерсть). Опишите то, что увидите.
2. Из пищевого алюминия изготовьте небольшой лёгкий цилиндр, привяжите его к нитке. Возьмите заряженное тело и поднесите к подвешенному цилиндру. Понаблюдайте, что будет при этом происходить. Цилиндр не выбрасывайте: он понадобится вам в дальнейшем.
3. Изготовьте простейший электроскоп (схему конструкции найдите в литературе или Интернете). Используйте свой прибор для определения наличия заряда у различных тел, которые вас окружают.

Электростатическая индукция.

§ 45. Закон Кулона



Ш. Кулон

Повторите: закон всемирного тяготения.

Взаимодействие зарядов. Взаимодействие неподвижных электрических зарядов изучает *электростатика*. Основной закон электростатики был экспериментально установлен французским физиком Ш. Кулоном (1736—1806) в 1785 г. В опытах Кулона измерялись силы взаимодействия заряженных шаров. На тонкой проволоке была подвешена стеклянная палочка с двумя металлическими шарами на концах. Одному из них сообщался электрический заряд, против него устанавливался другой заряженный шар (рис. 4.6). Сила взаимодействия заряженных шаров определялась по углу поворота стеклянной палочки, закручивающей нить подвеса. Расстояние между центрами шаров нетрудно было измерить.



Рис. 4.6

Кулону не был известен метод измерения заряда на шарах. Но он применил интересный приём дробления заряда. Исходя из принципа симметрии, Кулон пришёл к выводу, что при соприкосновении металлического шара с зарядом q с незаряженным шаром такого же радиуса электрический заряд разделяется на две равные части и на каждом из шаров оказывается заряд $q/2$.

Хотя Кулон производил опыты с шариками конечных размеров и точность эксперимента была невелика, ему удалось точно сформулировать *основной закон электростатики*, названный впоследствии его именем.

ЗАКОН КУЛОНА Два точечных неподвижных электрических заряда взаимодействуют в вакууме с силой $F_э$, модуль которой прямо пропорционален произведению модулей этих зарядов $|q_1|$ и $|q_2|$ и обратно пропорционален квадрату расстояния между ними:

$$|F_э| = k\frac{|q_1||q_2|}{r^2}.$$

ЗАПОМНИТЕ Взаимодействие неподвижных электрических зарядов называют **электростатическим** или **кулоновским** взаимодействием.

Справедливость этого закона подтверждена с огромной точностью всей совокупностью исследований электромагнитных явлений.

Направление кулоновской силы.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Кулоновская сила направлена вдоль прямой, соединяющей оба точечных заряда. Она подчиняется третьему закону Ньютона: заряды взаимодействуют друг с другом с силами, равными по модулю и противоположными по направлению.

Рассмотрим, как направлена сила, с которой заряд Q действует на пробный заряд q (рис. 4.7). Направим радиус-вектор $\vec{r}$ от заряда Q к пробному заряду q. Поскольку одноимённые заряды отталкиваются, а разноимённые притягиваются, то в случае одноимённых зарядов вектор силы имеет то же направление, что и радиус-вектор. В случае же взаимодействия разноимённых зарядов вектор силы направлен противоположно радиус-вектору.

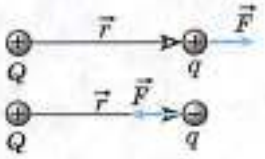


Рис. 4.7

Единица электрического заряда. Единицей электрического заряда в СИ служит кулон (Кл). 1 Кл — это количество электричества, проходящее за 1 с через площадь поперечного сечения проводника при силе тока 1 А:

$$1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}.$$

Определение единицы силы тока 1 А будет дано в § 59.

Электрическая постоянная. Как показывает опыт, при таком выборе единицы электрического заряда коэффициент пропорциональности k в выражении закона Кулона оказывается равным

$$k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2.$$

Таким образом, два точечных заряда Q и q, каждый из которых равен 1 Кл, взаимодействуют в вакууме на расстоянии $r = 1$ м с силой $F = 9 \cdot 10^9$ Н.

Вместо коэффициента k часто применяется другой коэффициент, называемый *электрической постоянной*:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}.$$

Тогда закон Кулона будет записан так: $F = \dfrac{|Q||q|}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$.

Принцип суперпозиции. Опыт показывает, что сила взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов q_1 и q_2 не изменяется при появлении около них третьего заряда q_3, четвёртого q_4 и т. д.

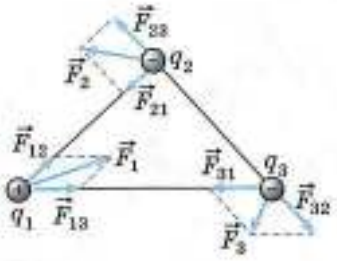


Рис. 4.8

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Силы взаимодействия $\vec{F}_{12}$, $\vec{F}_{13}$, ..., $\vec{F}_{1n}$ заряда q_1 с каждым из зарядов q_2, q_3, ..., q_n определяются по закону Кулона, а результирующая сила взаимодействия $\vec{F}_1$ является геометрической суммой векторов сил взаимодействия заряда q_1 с каждым из этих зарядов (рис. 4.8):

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \ldots + \vec{F}_{1n}.$$

Независимость электрического взаимодействия двух точечных зарядов от присутствия других зарядов свидетельствует о том, что для сил электростатического взаимодействия справедлив *принцип суперпозиции*, о котором шла речь в § 9.

Электростатика. Электростатическое взаимодействие. Основной закон электростатики. Точечный заряд. Электрическая постоянная. Принцип суперпозиции

1. Опишите опыты Кулона по исследованию взаимодействия электрических зарядов. 2. Чем отличается закон Кулона от закона всемирного тяготения? 3. В каких единицах выражается электрический заряд? 4. В чём состоит принцип суперпозиции? 5. Что такое электрическая постоянная?

ЗАДАЧА. Точечные электрические заряды q_1, q_2 и q_3 находятся в вершинах прямоугольника. Определите силу $\vec{F}_3$, с которой действуют на заряд q_3 электрические заряды q_1 и q_2. Расстояние между зарядами q_3 и q_1 равно 1 см, между зарядами q_3 и q_2 — 3 см; $q_3 = 10^{-9}$ Кл, $q_1 = -10^{-9}$ Кл, $q_2 = -4 \cdot 10^{-9}$ Кл.

Решение. Силу $\vec{F}_3$, с которой электрические заряды q_1 и q_2 действуют на заряд q_3, можно найти как сумму сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, действующих со стороны каждого из зарядов q_1 и q_3 на заряд q_3 (рис. 4.9): $\vec{F}_3 = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$.

Так как угол между векторами $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ равен 90°, то модуль вектора $\vec{F}_3$ можно найти, используя теорему Пифагора: $F_3 = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$, где

$$F_1 = k\frac{|q_1||q_3|}{r_1^2} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-9}}{10^{-4}}\ (\text{Н}) = 9 \cdot 10^{-5}\ \text{Н};$$

$$F_2 = k\frac{|q_2||q_3|}{r_2^2} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 4 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-9}}{9 \cdot 10^{-4}}\ (\text{Н}) = 4 \cdot 10^{-5}\ \text{Н};$$

$$F_3 = \sqrt{81 \cdot 10^{-10} + 16 \cdot 10^{-10}}\ (\text{Н}) \approx 10^{-4}\ \text{Н}.$$

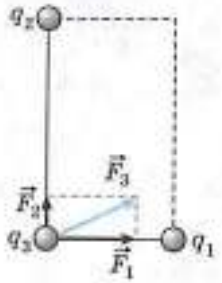


Рис. 4.9

РЕШИТЕ

45.1. Сравните силы гравитационного и электрического взаимодействия электрона и протона. Масса электрона $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг, масса протона $1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг.

45.2. Три отрицательных заряда, по модулю равные $9 \cdot 10^{-9}$ Кл, расположены в вершинах равностороннего треугольника. Какой заряд нужно поместить в центр этого треугольника, чтобы система зарядов находилась в равновесии? Будет ли равновесие устойчивым?

45.3. В трёх вершинах квадрата со стороной 10 см находятся одинаковые точечные положительные заряды, равные $3 \cdot 10^{-8}$ Кл. С какой силой будут действовать эти заряды на положительный точечный электрический заряд $2 \cdot 10^{-8}$ Кл, расположенный в четвёртой вершине квадрата?

45.4. Какая доля атомов в звёздах должна потерять электроны для того, чтобы силы кулоновского отталкивания положительно заряженных звёзд скомпенсировали силы всемирного тяготения? Звёзды считайте состоящими из водорода.

Из пищевого алюминия изготовьте лёгкий цилиндр, аналогичный тому, который вы сделали ранее. Также привяжите его к нитке. Возьмите заряженное тело и коснитесь им одного из цилиндров. Затем приведите в соприкосновение оба цилиндра. Понаблюдайте, что будет при этом происходить с цилиндрами.

Электростатический маятник.

§ 46. Электрическое поле

Повторите: точечный заряд, принцип суперпозиции.

Идеи Фарадея. Взаимодействие зарядов по закону Кулона является экспериментально установленным фактом. Однако математическое выражение закона взаимодействия зарядов не раскрывает физической картины самого процесса взаимодействия, не отвечает на вопрос, каким путём осуществляется действие одного заряда на другой.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Великий английский физик М. Фарадей (1791—1867) дал факту взаимодействия электрических зарядов следующее объяснение: вокруг каждого электрического заряда всегда существует *электрическое поле*. Электрическое поле — материальный объект, непрерывный в пространстве и способный действовать на другие электрические заряды.

Согласно этим представлениям взаимодействие электрических зарядов q_1 и q_2 есть результат действия поля заряда q_1 на заряд q_2 и соответственно поля заряда q_2 на заряд q_1.

То, что электрическое поле *объективно существует*, что оно материально, доказывается при рассмотрении явлений, происходящих при ускоренном движении электрических зарядов. Этот вопрос будет рассмотрен в 11 классе при изучении электромагнитных волн. Здесь мы остановимся только на одном факте.

Пока электрические заряды q_1 и q_2 неподвижны и находятся в точках A и B, на заряд q_2 со стороны заряда q_1 действует сила $-\vec{F}$, направленная вдоль прямой BA (рис. 4.10). Если в некоторый момент времени t заряд q_1 начинает двигаться из точки A в точку C, то модуль и направление силы, действующей на заряд q_2, должны измениться.

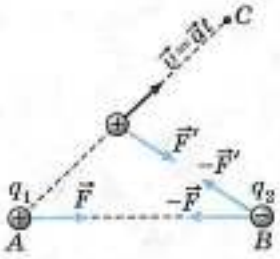


Рис. 4.10

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Согласно представлениям *теории дальнодействия* эти изменения должны были бы происходить мгновенно, т. е. в любой момент времени кулоновская сила должна быть направлена вдоль прямой, соединяющей заряды.

Однако в действительности наблюдается другая картина. Если в некоторый момент времени t заряд q_1 выходит из состояния покоя и движется ускоренно, то изменение силы, действующей со стороны заряда q_1 на заряд q_2, наблюдается лишь через промежуток времени Δt, определяемый выражением $\Delta t = l/c$, где l — расстояние между зарядами; $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Запаздывание изменений взаимодействия электрических зарядов при их ускоренном движении доказывает справедливость теории *близкодействия*, согласно которой взаимодействие электрических зарядов осуществляется с помощью электромагнитного поля. С этой скоростью распространяются любые изменения в электрическом поле при ускоренном движении электрических зарядов.

ИНТЕРЕСНО Запаздывание изменений в электрическом поле на расстояниях в несколько метров обнаружить довольно трудно из-за большого значения скорости света. В космонавтике же эти запаздывания легко обнаружить, однако они создают определённые дополнительные трудности в управлении космическими аппаратами. Так, при управлении луноходом команды, отправленные антеннами радиопередатчиков с пункта космической связи, достигали приёмных антенн лунохода лишь через 1,3 с после отправления, так как расстояние от Земли до Луны составляет примерно 400 000 км. При осуществлении посадки на поверхность планеты Венера автоматические космические станции «Венера» получали команды с Земли спустя 3,5 мин после их отправления, так как расстояние между Землёй и Венерой превышает 60 млн км.

Напряжённость электрического поля.

ЗАПОМНИТЕ Физическая величина, равная отношению силы $\vec{F}$, с которой электрическое поле действует на пробный точечный заряд q, к значению этого заряда, называется **напряжённостью электрического поля** и обозначается символом $\vec{E}$:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \qquad (46.1)$$

Для модуля вектора напряжённости получим

$$E = \frac{|Q|}{4\pi\varepsilon_0 r^2}.$$

Заряд Q обычно называется *источником поля*, заряд q — *пробным зарядом*.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Напряжённость электрического поля точечного заряда прямо пропорциональна модулю заряда источника поля Q и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника до данной точки поля.

За направление вектора напряжённости электрического поля принимается направление вектора кулоновской силы, действующей на пробный положительный электрический заряд, помещённый в данную точку поля.

Выражение (46.1) позволяет найти единицу напряжённости электрического поля — это 1 Н/Кл. Единицей СИ напряжённости электрического поля служит вольт на метр. В § 49 мы покажем, что 1 В/м = 1 Н/Кл.

Зная напряжённость электрического поля $\vec{E}$ в данной точке поля, можно определить модуль и направление вектора силы, с которой электрическое поле будет действовать на любой электрический заряд q в этой точке:

$$\vec{F} = \vec{E}q.$$

Опыт показывает, что если на электрический заряд q действуют одновременно электрические поля нескольких источников, то результирующая сила оказывается равной геометрической сумме сил, действующих со стороны каждого поля в отдельности. Это свойство электрических полей означает, что они подчиняются *принципу суперпозиции*:

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ если в данной точке пространства различные заряженные частицы создают электрические поля с напряжённостями $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$ и т. д., то вектор напряжённости результирующего электрического поля равен сумме векторов напряжённостей всех электрических полей:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots + \vec{E}_n.$$

Справедливость принципа суперпозиции для взаимодействия электрических зарядов показывает, что электрические поля различных источников существуют в одной и той же точке пространства и действуют на электрические заряды независимо друг от друга.

Линии напряжённости электрического поля.

ЗАПОМНИТЕ **Линией напряжённости электрического поля** называется линия, касательная к которой в каждой точке направлена вдоль вектора напряжённости $\vec{E}$.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Линии напряжённости электрического поля начинаются на положительных электрических зарядах и заканчиваются на отрицательных электрических зарядах. Они могут также уходить в бесконечность от положительных зарядов и приходить из бесконечности к отрицательным зарядам.

Распределение линий напряжённости вокруг уединённых точечных зарядов показано на рисунке 4.11.

Определяя направление вектора $\vec{E}$ в различных точках пространства, можно представить картину распределения линий напряжённости электрического поля от разных источников. Для двух разноимённых зарядов эта картина имеет вид, показанный на рисунке 4.12, *а*, для одноимённых — на рисунке 4.12, *б*.

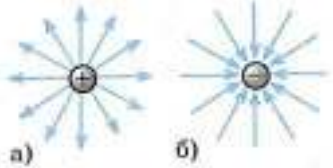


Рис. 4.11

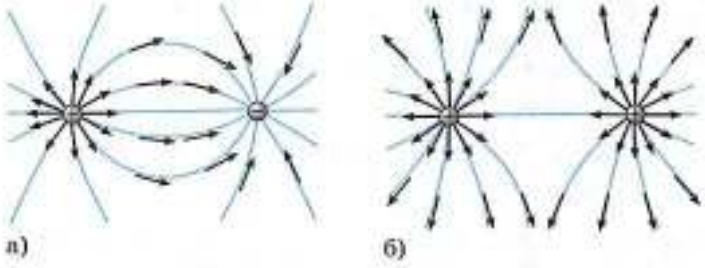


Рис. 4.12

Однородное электрическое поле.

Приблизительно однородным является электрическое поле между двумя разноимённо заряженными плоскими металлическими пластинами, если расстояние между ними значительно меньше их размеров. Линии напряжённости в однородном электрическом поле параллельны друг другу (рис. 4.13).



Рис. 4.13

ЗАПОМНИТЕ Электрическое поле, в котором напряжённость одинакова по модулю и направлению в любой точке пространства, называется **однородным электрическим полем.**

Электрическое поле. Теория дальнодействия. Теория близкодействия. Напряжённость электрического поля. Однородное электрическое поле

1. Как объясняет взаимодействие электрических зарядов теория поля? 2. Какие опытные факты доказывают справедливость теории поля? 3. В чём заключается принцип суперпозиции полей? 4. Зависит ли напряжённость поля от пробного заряда, помещённого в данную точку поля? от заряда, создающего поле? 5. Что называется линией напряжённости электрического поля? 6. Будет ли заряженное тело, помещённое в электрическое поле, обязательно двигаться по линиям напряжённости этого поля, если никакие другие силы, кроме электростатических, на него не действуют? 7. Могут ли линии напряжённости электростатического поля касаться друг друга или пересекаться?

ЗАДАЧА 1. Вычислите напряжённость электрического поля в точке A, находящейся на прямой, проходящей через два положительных точечных электрических заряда q_1 и q_2, расположенные в точках B и C: $q_1 = 10^{-10}$ Кл, $q_2 = 2 \cdot 10^{-10}$ Кл, $AB = 3$ см, $BC = 9$ см. Рассмотрите все возможные случаи расположения точки A по отношению к точкам B и C.

Решение. Напряжённость $\vec{E}_A$ электрического поля в точке A равна $\vec{E}_A = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$, где $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ — напряжённости полей, создаваемых в точке A зарядами q_1 и q_2. Модули напряжённостей $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ соответственно равны $E_1 = \frac{|q_1|}{4\pi\varepsilon_0 r_1^2}$, $E_2 = \frac{|q_2|}{4\pi\varepsilon_0 r_2^2}$, где $r_1 = AB$, $r_2 = AC$; $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$.

По условию задачи возможны два случая. В первом случае точка A находится между точками B и C (рис. 4.14, *а*). Тогда $r_1 = AB = 3 \cdot 10^{-2}$ м, $r_2 = AC = 9 \cdot 10^{-2}$ м $- 3 \cdot 10^{-2}$ м $= 6 \cdot 10^{-2}$ м и для E_1 и E_2 соответственно имеем

$$E_1 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-10}}{9 \cdot 10^{-4}} \left(\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}\right) = 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}, \qquad E_2 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-10}}{36 \cdot 10^{-4}} \left(\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}\right) = 5 \cdot 10^2 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$$

Векторы $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ направлены противоположно, по модулю вектор $\vec{E}_1$ больше вектора $\vec{E}_2$. Поэтому вектор $\vec{E}_A$ направлен от точки B к точке A и модуль его равен $E_A = E_1 - E_2$; $E_A = 10^3$ Н/Кл $- 5 \cdot 10^2$ Н/Кл $= 5 \cdot 10^2$ Н/Кл.

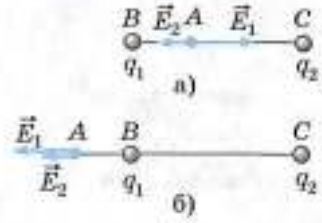


Рис. 4.14

Во втором случае точки A и C находятся по разные стороны от точки B (рис. 4.14, *б*). В этом случае $r_1 = AB = 3 \cdot 10^{-2}$ м, $r_2 = AC = AB + BC = 3 \cdot 10^{-2}$ м $+ 9 \cdot 10^{-2}$ м $= 12 \cdot 10^{-2}$ м; $E_1 = 10^3$ Н/Кл,

$$E_2 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-10}}{144 \cdot 10^{-4}} \left(\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}\right) \approx 0{,}125 \cdot 10^3 \text{ Н/Кл}.$$

Векторы $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ направлены в одну сторону: $E_A = E_1 + E_2 = 10^3$ Н/Кл $+ 0{,}125 \cdot 10^3$ Н/Кл $= 1{,}125 \cdot 10^3$ Н/Кл.

ЗАДАЧА 2. Определите напряжённость электрического поля, созданного двумя разноимёнными зарядами $|Q_1| = |Q_2| = Q$, находящимися на расстоянии $2l$ друг от друга (такая система зарядов называется диполем), в точке, равноудалённой от этих зарядов. Расстояние от этой точки до линии, соединяющей заряды, равно r.

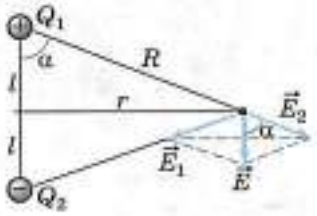


Рис. 4.15

Решение. Напряжённость $\vec{E}$ в искомой точке можно найти как векторную сумму напряжённостей электростатических полей, создаваемых обоими зарядами в данной точке (рис. 4.15).

Модули напряжённостей электростатических полей, создаваемых этими зарядами, равны $E_1 = E_2 = \dfrac{Q}{4\pi\varepsilon_0(r^2 + l^2)}$.

Модуль E суммарной напряжённости в исследуемой точке $E = 2E_1\cos\alpha$, где $\cos\alpha = \dfrac{l}{\sqrt{r^2 + l^2}}$.

Подставив значения E_1 и $\cos\alpha$ в выражение для E, получим

$$E = \frac{2Q}{4\pi\varepsilon_0(r^2 + l^2)} \cdot \frac{l}{\sqrt{r^2 + l^2}} = \frac{Ql}{2\pi\varepsilon_0(r^2 + l^2)^{3/2}}.$$

Анализ полученной формулы показывает, что на расстоянии $r \gg l$ выражение для E можно записать в виде $E = \dfrac{Ql}{2\pi\varepsilon_0 r^3}$.

Таким образом, мы показали, что напряжённость поля диполя уменьшается с ростом расстояния от него обратно пропорционально кубу расстояния, т. е. быстрее, чем напряжённость поля точечного заряда.

РЕШИТЕ

46.1. Вычислите напряжённость электростатического поля на первой орбите атома водорода. Радиус орбиты равен $5 \cdot 10^{-11}$ м, ядром атома водорода является протон.

46.2. На точечный электрический заряд $5 \cdot 10^{-10}$ Кл электрическое поле действует с силой 10^{-7} Н. Определите напряжённость электрического поля.

46.3. Напряжённость поля на расстоянии 30 см от точечного заряда равна 900 Н/Кл. Чему равна напряжённость поля на расстоянии 10 см от этого заряда?

46.4. Используя закон Кулона, докажите, что на заряд, помещённый внутрь равномерно заряженной сферы, не действуют электрические силы.

46.5. Водяная капля имеет электрический заряд, равный одному элементарному заряду (заряду электрона). Определите массу, радиус капли и число молекул воды в ней, если известно, что действие силы тяжести на каплю уравновешивается действием электрического поля Земли. Напряжённость электрического поля Земли равна 130 Н/Кл, вектор напряжённости направлен к центру Земли.

Что будет происходить с алюминиевым цилиндром, если поднести к нему сначала одно заряженное тело, а потом одновременно два заряженных тела с противоположных сторон?

Способы получения однородного электрического поля.

§ 47. Теорема Гаусса

Повторите: вектор, нормаль к поверхности, телесный угол, поток, напряжённость.

Поток вектора напряжённости. Введём ещё одну физическую величину, характеризующую электрическое поле, — *поток вектора напряжённости*. С помощью этой величины мы сможем рассчитать напряжённости электрических полей, источниками которых являются не только точечные заряды, но и заряды, распределённые непрерывно по некоторым поверхностям — плоскости, сфере, цилиндру и т. д.

ЗАПОМНИТЕ **Элементарным потоком вектора напряжённости** через малую площадку называется произведение модуля вектора $\vec{E}$ на площадь ΔS площадки и косинус угла между вектором $\vec{E}$ и нормалью $\vec{n}_0$ к площадке (рис. 4.16):

$$\Delta\Phi = E\Delta S\cos\alpha. \qquad (47.1)$$

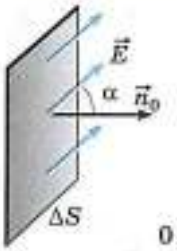


Рис. 4.16

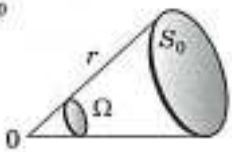


Рис. 4.17

Заметим, что если поверхность замкнутая, то выбирается внешняя нормаль к ней.

Полный поток через поверхность равен сумме элементарных потоков через все её участки:

$$\Phi = \Sigma\Delta\Phi = \Sigma E\Delta S\cos\alpha. \qquad (47.2)$$

Чтобы вычислить значение полного потока, оказывается полезным ввести ещё одно вспомогательное понятие — *телесный угол*.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Мерой телесного угла Ω (рис. 4.17) служит отношение площади S_0 поверхности шарового сегмента к квадрату радиуса:

$$\Omega = \frac{S_0}{r^2}.$$

ЗАПОМНИТЕ Единица телесного угла — стерадиан (сокращённо: ср) — это телесный угол с вершиной в центре сферы, вырезающий на поверхности сферы элемент, площадь которого равна квадрату радиуса.

Итак, $\Omega = 1$ ср, если $S_0 = r^2$.

Нетрудно убедиться, что полный телесный угол вокруг точки равен 4π ср. В самом деле, поверхность сферы равна $4\pi r^2$, следовательно, $\Omega_{полн} = 4\pi r^2/r^2 = 4\pi$ ср.

Теорема Гаусса. Вернёмся к выражению для элементарного потока (47.1). Пусть электрическое поле создаётся точечным зарядом q, тогда модуль вектора напряжённости $E = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$. Подставив в формулу (47.1), получим

$$\Delta\Phi = E\Delta S\cos\alpha = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{\Delta S\cos\alpha}{r^2}.$$

Как видно из рисунка 4.18, *а*, $\Delta S\cos\alpha = \Delta S_0$, при этом площадка площадью ΔS_0 перпендикулярна радиусу. Тогда

$$\Delta\Phi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{\Delta S_0}{r^2} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\Delta\Omega. \qquad (47.3)$$

Теперь уже нетрудно получить выражение для полного потока вектора $\vec{E}$ через произвольную замкнутую поверхность:

$$\Phi = \sum\Delta\Phi = \sum\frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\Delta\Omega = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\sum\Delta\Omega = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}4\pi = \frac{q}{\varepsilon_0}.$$

Таким образом,

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

если точечный заряд расположен внутри произвольной замкнутой поверхности, то полный поток вектора напряжённости через эту поверхность равен:

$$\Phi = \frac{q}{\varepsilon_0}. \qquad (47.4)$$

Этот результат не зависит ни от формы поверхности, ни от того, где внутри поверхности расположен заряд.

Осталось рассмотреть случай, когда заряд находится вне замкнутой поверхности. Нетрудно убедиться, что поток в этом случае равен нулю. В самом деле (рис. 4.18, *б*), элементарные потоки $\Delta\Phi_1$ и $\Delta\Phi_2$ через площадки ΔS_1 и ΔS_2 по модулю равны, ибо они вписаны в один и тот же телесный угол $\Delta\Omega$ (см. формулу (47.3)). Однако знаки этих потоков противоположны, так как угол α_1 острый и $\cos\alpha > 0$, а угол α_2 тупой и $\cos\alpha_2 < 0$.

Итак, сумма этих двух элементарных потоков равна нулю. То же будет справедливо и для всех других участков замкнутой поверхности. Следовательно,

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

если заряд расположен вне замкнутой поверхности, то поток вектора напряжённости от этого источника равен нулю.

Если же внутри поверхности расположен не один точечный заряд, а их совокупность или если заряд распределён по некоторой поверхности либо в некотором объёме, то выражение (47.4) легко обобщается (на основе принципа суперпозиции; см. с. 40 и 235):

$$\Phi = \frac{1}{\varepsilon_0}\sum q_{\text{внутр}}.$$

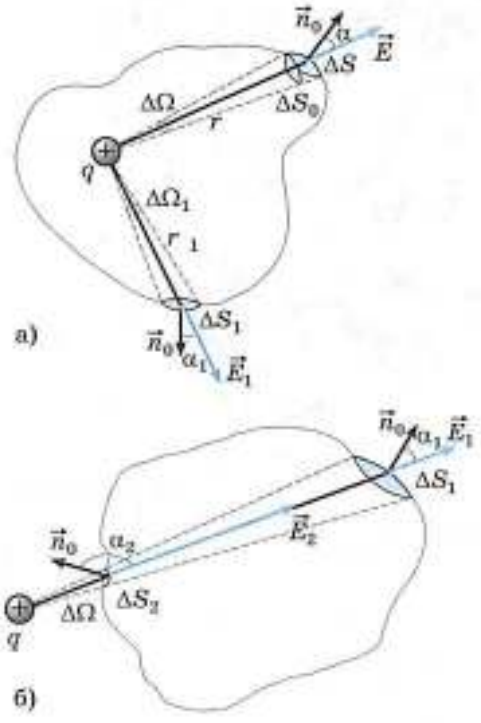


Рис. 4.18

Как видно из рисунка 4.18, *а*, $\Delta S\cos\alpha = \Delta S_0$, при этом площадка площадью ΔS_0 перпендикулярна радиусу. Тогда

$$\Delta\Phi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{\Delta S_0}{r^2} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\Delta\Omega. \qquad (47.3)$$

Теперь уже нетрудно получить выражение для полного потока вектора $\vec{E}$ через произвольную замкнутую поверхность:

$$\Phi = \sum\Delta\Phi = \sum\frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\Delta\Omega = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\sum\Delta\Omega = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}4\pi = \frac{q}{\varepsilon_0}.$$

Таким образом,

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

если точечный заряд расположен внутри произвольной замкнутой поверхности, то полный поток вектора напряжённости через эту поверхность равен:

$$\Phi = \frac{q}{\varepsilon_0}. \qquad (47.4)$$

Этот результат не зависит ни от формы поверхности, ни от того, где внутри поверхности расположен заряд.

Осталось рассмотреть случай, когда заряд находится вне замкнутой поверхности. Нетрудно убедиться, что поток в этом случае равен нулю. В самом деле (рис. 4.18, *б*), элементарные потоки $\Delta\Phi_1$ и $\Delta\Phi_2$ через площадки ΔS_1 и ΔS_2 по модулю равны, ибо они вписаны в один и тот же телесный угол $\Delta\Omega$ (см. формулу (47.3)). Однако знаки этих потоков противоположны, так как угол α_1 острый и $\cos\alpha > 0$, а угол α_2 тупой и $\cos\alpha_2 < 0$.

Итак, сумма этих двух элементарных потоков равна нулю. То же будет справедливо и для всех других участков замкнутой поверхности. Следовательно,

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

если заряд расположен вне замкнутой поверхности, то поток вектора напряжённости от этого источника равен нулю.

Если же внутри поверхности расположен не один точечный заряд, а их совокупность или если заряд распределён по некоторой поверхности либо в некотором объёме, то выражение (47.4) легко обобщается (на основе принципа суперпозиции; см. с. 40 и 235):

$$\Phi = \frac{1}{\varepsilon_0}\sum q_{\text{внутр}}.$$

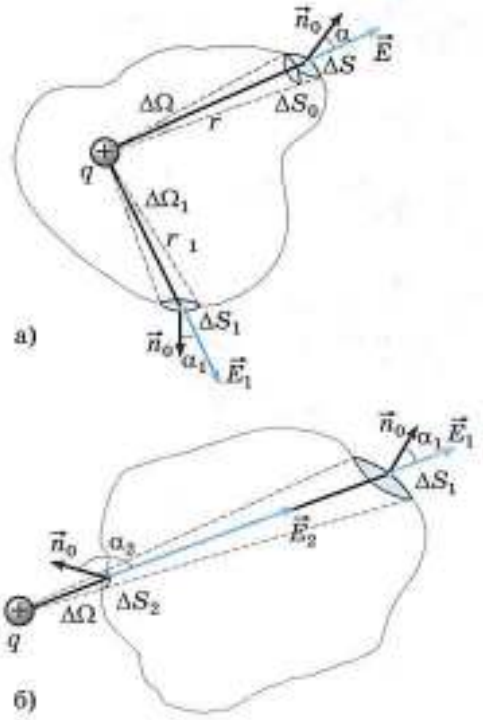


Рис. 4.18

Напряжённость электрического поля между разноимённо заряженными пластинами. Если размеры пластин значительно превосходят расстояние между ними, то электрическое поле каждой из пластин можно считать близким к полю бесконечной равномерно заряженной плоскости. Так как линии напряжённости электрического поля разноимённо заряженных пластин между ними направлены в одну сторону (рис. 4.20), то напряжённость поля между пластинами равна:

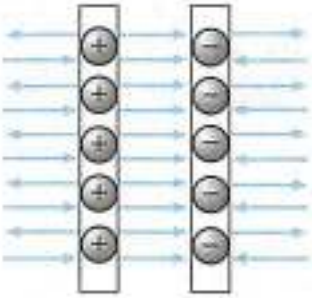


Рис. 4.20

$$E = E_1 + E_2 = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} + \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}. \qquad (47.6)$$

Так как

$$\sigma = \frac{Q}{S},$$

где Q — заряд одной пластины; S — её площадь, то

$$E = \frac{Q}{S\varepsilon_0}. \qquad (47.7)$$

Во внешнем пространстве линии напряжённости электрического поля разноимённо заряженных пластин имеют противоположные направления, поэтому вне этих пластин результирующая напряжённость электрического поля практически равна нулю (см. рис. 4.20).

Выражения (47.5) и (47.7) справедливы для больших заряженных пластин, когда напряжённость определяется в точке, расположенной далеко от их краёв.

Поток вектора напряжённости, элементарный поток вектора напряжённости, теорема Гаусса, поверхностная плотность заряда

ЗАДАЧА 1. Используя теорему Гаусса, определите зависимость напряжённости электрического поля равномерно заряженной тонкой проволоки бесконечной длины от расстояния r до оси проволоки.

Решение. Выделим участок проволоки конечной длины l. Если линейная плотность заряда на проволоке $\tau = q/l$, то заряд выделенного участка $q = \tau l$.

Из соображений симметрии электрическое поле проволоки изобразим линиями напряжённости, расходящимися перпендикулярно поверхности проволоки (рис. 4.21).

Окружим этот участок цилиндрической поверхностью радиусом r таким образом, чтобы ось цилиндра совпадала с осью проволоки (см. рис. 4.21). При этом весь поток вектора напряжённости будет выхо-



Рис. 4.21

дить через боковую поверхность цилиндра, площадь которой $S = 2\pi rl$, так как поток через оба основания цилиндра равен нулю. В этом случае из выражений (47.2) и (47.4) следует: $\Phi = E2\pi rl = \frac{\tau l}{\varepsilon_0}$, откуда

$$E = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0 r}.$$

Анализ этой формулы показывает, что напряжённость электрического поля тонкой, равномерно заряженной, бесконечно длинной и прямой проволоки обратно пропорциональна расстоянию от неё.

ЗАДАЧА 2. Используя теорему Гаусса, определите зависимость напряжённости электростатического поля равномерно заряженной сферической поверхности радиусом R от расстояния r до центра сферы. Заряд на сфере равен q.

Решение. Линии напряжённости электрического поля, создаваемого сферой, расходятся радиально. Окружим заряженную сферу сферической поверхностью радиусом $r > R$ (рис. 4.22). Поток вектора напряжённости через сферическую поверхность равен:

$$\Phi = 4\pi r^2 E.$$

На основании теоремы Гаусса получим

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}.$$



Рис. 4.22

Анализ этой формулы показывает, что электростатическое поле вне равномерно заряженной сферы не отличается от поля точечного заряда, если заряд сферы поместить в её центре.

Можно доказать, что напряжённость электрического поля в любой точке внутри равномерно заряженной сферы равна нулю.

РЕШИТЕ

47.1. Напряжённость электрического поля у поверхности Земли равна 130 Н/Кл. Оцените электрический заряд земного шара.

47.2. Напряжённость электрического поля у поверхности бесконечно длинного цилиндрического проводника радиусом 1 см равна 10 Н/Кл. Какой заряд находится на участке провода длиной 1 м? Чему равна напряжённость электрического поля на расстоянии 40 см от оси цилиндра?

Линейная плотность заряда, поверхностная плотность заряда, объёмная плотность заряда.

§ 48. Работа сил электрического поля

Повторите: работа силы, потенциальная энергия гравитационного взаимодействия.

Работа сил электрического поля при перемещении электрического заряда. В § 16 было показано, что при перемещении тела между двумя точками в гравитационном поле работа силы тяжести не зависит от формы траектории его движения.

Силы гравитационного и электрического взаимодействия имеют одинаковую зависимость от расстояния, векторы гравитационных и кулоновских сил при взаимодействии точечных тел направлены по прямой, соединяющей взаимодействующие тела. Следовательно, при перемещении заряда в электростатическом поле из одной точки в другую работа сил электрического поля не зависит от формы траектории.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Работа электростатических (кулоновских) сил по любой замкнутой траектории равна нулю.

Работа в однородном поле. Независимость работы сил электростатического поля от формы траектории движения заряда между двумя точками однородного поля можно доказать следующим способом.

Пусть в однородном электрическом поле напряжённостью $\vec{E}$ электрический заряд q перемещается из точки B в точку D (рис. 4.23). Если заряд двигался по прямой BD, то работа электрического поля равна:

$$A = Fs\cos\alpha = qEd,$$

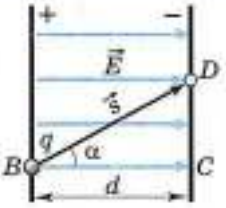


Рис. 4.23

где s — модуль вектора перемещения; α — угол между направлениями вектора кулоновской силы $\vec{F} = q\vec{E}$ и вектора перемещения заряда $\vec{s}$.

Если заряд из точки B сначала двигался по прямой в точку C, а затем по прямой из точки C в точку D, то работа сил электрического поля равна:

$$A_2' = A_{BC} + A_{CD} = qE \cdot BC\cos 0° + qE \cdot CD\cos 90° = qEd.$$

Мы видим, что работа сил однородного электрического поля при перемещении электрического заряда по прямой BD и по ломаной BCD одинакова и равна произведению электрического заряда на напряжённость электрического поля E и расстояние $BC = d$, на которое переместился заряд вдоль линии напряжённости электрического поля:

$$A = qEd. \qquad (48.1)$$

Любую линию, соединяющую точки B и D в однородном электрическом поле, можно приближённо представить состоящей из последовательных отрезков, расположенных параллельно и перпендикулярно линиям напряжённости (рис. 4.24).

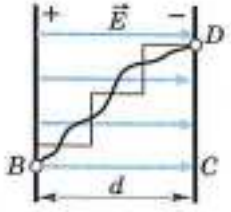


Рис. 4.24

Применив такие же рассуждения для каждого участка траектории, получим, что выражение (48.1) пригодно для вычисления работы сил однородного электрического поля при движении заряда по любой траектории.

При изменении направления перемещения работа сил электрического поля, как и работа силы тяжести, изменяет знак на противоположный. Если при перемещении заряда q из точки B в точку D силы электрического поля совершили работу A, то при перемещении этого заряда по тому же самому пути из точки D в точку B они совершают работу $-A$. Но так как работа не зависит от формы траектории, то и при перемещении по любой другой траектории тоже совершается работа $-A$. Отсюда следует, что при перемещении заряда по замкнутой траектории суммарная работа сил электростатического поля оказывается равной нулю.

ЗАПОМНИТЕ Поле, работа сил которого по любой замкнутой траектории равна нулю, называется **потенциальным** (консервативным) полем.

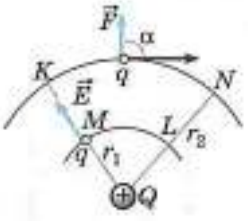


Рис. 4.25

Гравитационное и электростатическое поля являются потенциальными полями.

Работа в поле точечного заряда. Определим работу, которая совершается при перемещении пробного заряда в электрическом поле, источником которого является положительный заряд Q (рис. 4.25). Пусть положительный пробный заряд q находится сначала в точке M на расстоянии r_1, а затем оказывается в точке N на расстоянии r_2 от источника поля Q. Допустим также, что заряд двигался сначала вдоль радиуса по прямой MK, а затем по дуге $\overset{\frown}{KN}$ окружности радиусом r_2. Тогда работа по перемещению заряда из точки M в точку N равна сумме работ на участках MK и KN:

$$A_{MN} = A_{MK} + A_{KN}.$$

Очевидно, что работа по перемещению заряда по дуге равна нулю. В самом деле, здесь сила $F = \dfrac{qQ}{4\pi\varepsilon_0 r_2^2} = \text{const}$, а угол между векторами силы и перемещения $\alpha = 90°$. Итак, $A_{KN} = Fl\cos\alpha = Fl\cos 90° = 0$. Остаётся найти работу, совершаемую полем при перемещении пробного заряда вдоль радиуса, т. е. вдоль линии напряжённости.

Трудность этой задачи заключается в том, что в каждой точке пути сила $\vec{F}$, действующая на заряд со стороны электрического поля, принимает новое значение, т. е. это не постоянная, а переменная величина. Однако на очень малом отрезке пути Δr вдоль линии напряжённости элементарную работу ΔA сил электрического поля можно принять равной

$$\Delta A = F\Delta r = \frac{qQ}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\Delta r,$$

где r — расстояние от источника поля до отрезка Δr. Работу сил электрического поля при перемещении пробного заряда q из точки M, расположенной

на расстоянии r_1 от заряда Q, в точку K, расположенную на расстоянии r_2, можно найти как сумму элементарных работ на малых отрезках пути:

$$A_{MK} = \sum_{r_1}^{r_2} \Delta A_i = \sum_{r_1}^{r_2} F_i \Delta r_i.$$

Операция нахождения такой суммы при переходе к бесконечно малым значениям перемещения называется интегрированием. Интегрирование в данном случае даёт следующий результат:

$$A_{MK} = \frac{qQ}{4\pi\varepsilon_0 r_1} - \frac{qQ}{4\pi\varepsilon_0 r_2}.$$

Можно доказать, что если пробный заряд будет перемещаться по другой траектории, например по пути MLN, то результат окажется таким же. Итак, мы пришли к выводу, что

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ поле точечного заряда является *консервативным* (потенциальным) и работа по перемещению пробного заряда по произвольной траектории не зависит от формы траектории и определяется лишь положениями начальной и конечной точек:

$$A_{12} = \frac{qQ}{4\pi\varepsilon_0 r_1} - \frac{qQ}{4\pi\varepsilon_0 r_2}. \quad (48.2)$$

Работа и потенциальная энергия. Из раздела «Механика» (см. § 16) нам известно, что если работа не зависит от формы траектории, иными словами, если поле сил консервативное, то работу можно представить как разность потенциальных энергий в начале и конце траектории:

$$A = W_{p1} - W_{p2}. \quad (48.3)$$

(Мы будем в электростатике энергию обозначать буквой W, а не E, поскольку буквой E мы обозначаем напряжённость поля.) Сравнивая выражения (48.2) и (48.3), мы видим, что потенциальная энергия взаимодействия точечных зарядов равна:

$$W_p = \frac{qQ}{4\pi\varepsilon_0 r} + \text{const}. \quad (48.4)$$

Как и в общем случае, потенциальная энергия взаимодействия зарядов определяется с точностью до произвольного постоянного слагаемого, значение которого можно задать так, чтобы упростить решение задачи. Напомним, что точно так же обстоит дело с потенциальной энергией гравитационного взаимодействия.

Работа в однородном поле. Потенциальное поле. Потенциальная энергия взаимодействия точечных зарядов

1. Какие поля называются консервативными (потенциальными)? 2. Чему равна работа электрического поля при перемещении пробного заряда по замкнутой траектории? 3. Докажите, что однородное электрическое поле является консер-

вативным. 4. Чему равна работа электрического поля точечного заряда при перемещении пробного заряда из одной точки поля в другую? 5. Докажите, что электрическое поле точечного заряда является консервативным. 6. Чему равна потенциальная энергия взаимодействия двух точечных зарядов?



ЗАДАЧА. Точечный заряд $q_1 = 4$ нКл находится в поле шара, несущего заряд $q_2 = 10$ нКл, на расстоянии $r_1 = 50$ см от поверхности шара. Определите работу, которую нужно совершить, чтобы приблизить точечный заряд к шару на расстояние $r_2 = 25$ см от его поверхности.

Решение. Работа силы по перемещению заряда в поле шара зависит от начальной и конечной точек траектории:

$$A_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r_1} - \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r_2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r_1 r_2}(r_2 - r_1) \approx -0{,}7 \text{ мкДж}.$$

Знак минус указывает на то, что электростатическая сила препятствует перемещению заряда.

РЕШИТЕ

48.1. Согласно классической модели атома водорода электрон обращается вокруг протона на расстоянии $r = 5{,}3 \cdot 10^{-11}$ м. Определите кинетическую энергию электрона, его потенциальную и полную энергии. Какой смысл имеет отрицательное значение потенциальной и полной энергий? На бесконечно большом расстоянии между электроном и протоном потенциальная энергия принимается равной нулю.

48.2. Между двумя бесконечно длинными параллельными плоскими пластинами создано электрическое поле напряжённостью $E = 10^4$ Н/Кл. Расстояние между пластинами равно 20 мм. Из отрицательно заряженной пластины вылетел электрон с начальной скоростью, близкой к нулю. Чему будет равна его скорость, когда он долетит до положительно заряженной пластины?

48.3. На шарике радиусом 5 см находится электрический заряд $5 \cdot 10^{-5}$ Кл. Чему равна собственная энергия поля этого заряда?

48.4. Две бесконечно длинные параллельные плоские пластины заряжены разноимёнными зарядами с поверхностной плотностью $6 \cdot 10^{-4}$ Кл/м^2. Расстояние между пластинами равно 1,5 см. Определите работу, которую совершает поле, перемещая заряд $2{,}5 \cdot 10^{-6}$ Кл с одной пластины на другую.



Опыт Милликена.

§ 49. Потенциал электрического поля

Повторите: потенциальная энергия.

Потенциал. В предыдущем параграфе мы на примере двух полей — однородного поля и поля точечного заряда — доказали, что электростатическое поле является консервативным (потенциальным) и работа по перемещению заряда равна разности потенциальных энергий в начале и конце траектории (см. формулу (48.3)). Аналогично тому, как в § 46 была введена силовая характеристика электрического поля — его напряжённость, введём энергетическую характеристику электрического поля — *потенциал*.

ЗАПОМНИТЕ **Потенциалом** электрического поля в данной точке называется отношение потенциальной энергии, которой обладает пробный заряд, помещённый в данную точку поля, к этому заряду:

$$\varphi = \frac{W_p}{q}. \qquad (49.1)$$

Работа и разность потенциалов. Поскольку потенциальная энергия определяется лишь с точностью до произвольной постоянной, зависящей от выбора нулевого уровня, то это справедливо и для потенциала. Однако работа не зависит от этой произвольной постоянной, поскольку она определяется разностью потенциальных энергий. Сопоставив выражения (48.3) и (49.1), можно сделать вывод о том, что:

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ работа по перемещению электрического заряда между двумя точками поля равна произведению заряда на разность потенциалов начальной и конечной точек:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2). \qquad (49.2)$$

Единица потенциала. В Международной системе единиц единицей потенциала (а также, и разности потенциалов) служит вольт (В). 1 В — это разность потенциалов двух точек электрического поля, при перемещении между которыми заряда 1 Кл поле совершает работу 1 Дж.

Согласно выражению (49.2)

$$1\ \text{В} = \frac{1\ \text{Дж}}{1\ \text{Кл}}.$$

Потенциал поля точечного заряда. Сравнив выражения (48.4) и (49.1), получим выражение для потенциала поля точечного заряда:

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r} + \text{const}.$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Потенциал определён лишь с точностью до произвольной постоянной, зависящей от выбора нулевого уровня потенциала.

Обычно полагают равным нулю потенциал поля в точке, удалённой бесконечно далеко от точечного источника поля, т. е. при $r \to \infty$ потенциал $\varphi \to 0$.

Это означает, что при данном условии const = 0, тогда выражение для потенциала поля точечного заряда имеет вид

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r}.$$

Эквипотенциальные поверхности.

ЗАПОМНИТЕ Поверхность, во всех точках которой потенциал электрического поля имеет одинаковые значения, называется **эквипотенциальной поверхностью.**

Между двумя любыми точками на эквипотенциальной поверхности разность потенциалов равна нулю, поэтому работа сил электрического поля при любом перемещении заряда по эквипотенциальной поверхности равна нулю. Это означает, что вектор силы $\vec{F}$ в любой точке траектории при движении заряда по эквипотенциальной поверхности перпендикулярен вектору перемещения. Следовательно, линии напряжённости электростатического поля перпендикулярны эквипотенциальной поверхности. В самом деле, $\Delta A = F\Delta l\cos\alpha$. Если $\Delta A = 0$ при $F \neq 0$ и $l \neq 0$, то $\cos\alpha = 0$, следовательно, $\alpha = 90°$.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Эквипотенциальными поверхностями поля точечного заряда являются сферы, в центре которых расположен заряд.

Эквипотенциальные поверхности однородного электрического поля представляют собой плоскости, перпендикулярные линиям напряжённости.

Эквипотенциальные поверхности поля двух одноимённых точечных зарядов представлены на рисунке 4.26.

Связь между напряжённостью и разностью потенциалов. Установить эту связь для неоднородного поля можно, используя представление об эквипотенциальных поверхностях.

Рассчитаем работу, совершаемую электрическим полем при перемещении электрического заряда с одной эквипотенциальной поверхности на соседнюю по направлению нормали к этой поверхности (рис. 4.27). Если расстояние между поверхностями по нормали Δn настолько мало, что на этом участке можно считать поле однородным, то можем записать выражение для элементарной работы через напряжённость поля и расстояние между эквипотенциальными поверхностями:

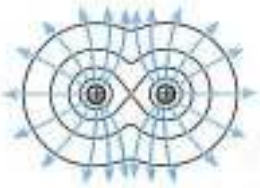


Рис. 4.26

$$\Delta A = qE\Delta n.$$

Но согласно формуле (49.2) работа поля по перемещению заряда из точки с потенциалом $\varphi_1 = \varphi$ в точку с потенциалом $\varphi_2 = \varphi + \Delta\varphi$ равна:

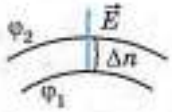


Рис. 4.27

$$\Delta A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = -q\Delta\varphi.$$

Приравнивая эти выражения для работы, получаем

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta n}.$$

В однородном поле значение Δn может быть любым. Если $\Delta n = d$, то

$$E = -\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{d}. \quad (49.3)$$

Из формулы (49.3) следует, что единицей напряжённости электрического поля в СИ является вольт, делённый на метр (В/м).

Потенциал поля системы зарядов. Потенциал — величина скалярная.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Если в некоторой точке пространства двумя зарядами (источниками поля) одновременно созданы электрические поля с потенциалами φ_1 и φ_2, то потенциал результирующего электрического поля равен алгебраической сумме потенциалов φ_1 и φ_2:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2.$$

Аналогичным способом можно найти потенциал электрического поля, созданного любым числом дискретных электрических зарядов, а также зарядом, распределённым на некоторой поверхности.

Электрическое напряжение. При перемещении электрического заряда в любом электрическом поле силы электрического поля совершают работу.

ЗАПОМНИТЕ Отношение работы A сил электрического поля к электрическому заряду q при его перемещении из одной точки в другую называется **электрическим напряжением.**

Электрическое напряжение обозначается буквой U:

$$U = \frac{A}{q}. \quad (49.4)$$

Сравнивая выражения (49.2) и (49.4), можно сделать вывод о том, что в электростатическом поле разность потенциалов между двумя точками равна напряжению между ними:

$$U_{1,2} = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Однако понятия «напряжение» и «разность потенциалов» не тождественны друг другу. Если перемещение электрического заряда происходит в непотенциальном электрическом поле, то задавать вопрос о значении напряжения между двумя точками имеет смысл, а задавать вопрос о значении разности потенциалов бессмысленно.

Единица электрического напряжения совпадает с единицей разности потенциалов в Международной системе единиц — 1 вольт (В).

Потенциал. Разность потенциалов. Эквипотенциальная поверхность. Связь между напряжённостью и разностью потенциалов. Электрическое напряжение

1. Какие общие закономерности имеют место в законах гравитационного и электростатического взаимодействия? 2. Что называется потенциалом электрического поля? 3. Как связана потенциальная энергия электрического заряда в электростатическом поле с потенциалом поля? 4. Как связана работа при перемещении заряда в электростатическом поле с потенциалами начальной и конечной точек траек-

тории? 5. Что такое эквипотенциальная поверхность? 6. Как расположены линии напряжённости электрического поля по отношению к эквипотенциальным поверхностям? 7. Каково соотношение между напряжённостью и потенциалом электростатического поля?

ЗАДАЧА 1. В кинескопе телевизора электроны ускоряются электрическим полем. Какую работу совершает электрическое поле при ускорении электрона, если разность потенциалов между начальной и конечной точками равна 10 кВ? Какую скорость приобретает электрон в конце пути?

Решение. Работа электрического поля $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$. Можно считать, что на электрон в кинескопе действуют только кулоновские силы, так как действием других сил можно пренебречь. В этом случае изменение кинетической энергии электрона равно работе сил электрического поля: $\Delta W_k = A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$.

Начальную скорость электрона можно считать равной нулю, поэтому кинетическая энергия электрона в конце пути $\frac{mv^2}{2} = q(\varphi_1 - \varphi_2)$. Из последнего уравнения можно получить выражение для скорости электрона в конце пути:

$$v = \sqrt{\frac{2q(\varphi_1 - \varphi_2)}{m}}.$$

Выполнив расчёты, получим $A = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл $\cdot 10^4$ В $= 1{,}6 \cdot 10^{-15}$ Дж;

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^4}{9{,}1 \cdot 10^{-31}}}\ (\text{м/с}) = 5{,}9 \cdot 10^7\ \text{м/с}.$$

ЗАДАЧА 2. В пространство между двумя разноимённо заряженными пластинами влетает электрон со скоростью $v = 5 \cdot 10^7$ м/с, направленной параллельно этим пластинам. На какое расстояние s сместится электрон за время движения между пластинами? Расстояние между пластинами $d = 0{,}02$ м, длина пластин $l = 0{,}05$ м и разность потенциалов между пластинами $\varphi_1 - \varphi_2 = 400$ В. Отношение заряда электрона к его массе $e/m = 1{,}76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

Решение. На электрон в однородном электрическом поле действует вдоль оси ординат постоянная сила $F_y = eE$, следовательно, смещение электрона от первоначального направления (рис. 4.28) равно $s = \frac{a_y t^2}{2}$.

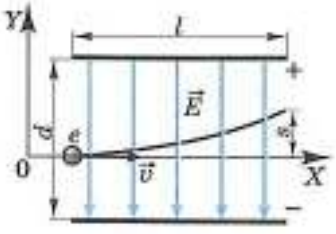


Рис. 4.28

Ускорение электрона $a_y = \frac{F_y}{m} = \frac{eE}{m} = \frac{e(\varphi_1 - \varphi_2)}{md}$.

Вдоль оси абсцисс на электрон сила не действует. Время движения между пластинами $t = l/v$.

Окончательно для смещения имеем $s = \frac{e(\varphi_1 - \varphi_2)l^2}{2mdv^2}$.

Подставляя значения величин, получаем

$$s = \frac{1{,}76 \cdot 10^{11} \cdot 4 \cdot 10^2 \cdot 25 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 25 \cdot 10^{14}}\ (\text{м}) = 1{,}76 \cdot 10^{-3}\ \text{м} = 1{,}76\ \text{мм}.$$

РЕШИТЕ

49.1. Положительный электрический заряд 2 Кл перемещается в электростатическом поле из точки с потенциалом 20 В в точку с потенциалом 5 В. Какую работу совершают при этом силы электрического поля?

49.2. При перемещении в электростатическом поле заряда 4 Кл электрические силы совершили работу 8 Дж. Определите разность потенциалов начальной и конечной точек пути.

49.3. На параллельных металлических пластинах находятся электрические заряды q и $3q$. Определите разность потенциалов между пластинами, если площадь каждой пластины S и расстояние между ними d. Между пластинами находится воздух. Примите $S \gg d^2$.

49.4. В пространство между параллельными незаряженными пластинами *1* и *2* вносится параллельно им пластина *3* с плотностью электрического заряда σ. Определите разность потенциалов между пластинами *1* и *2*, если расстояние между ними равно d.

49.5. На металлическом шаре радиусом r имеется электрический заряд q. Каким станет потенциал шара, если внести его внутрь металлической сферы радиусом R, изолированной от Земли, и коснуться им внутренней поверхности сферы?

49.6. Разность потенциалов между двумя заряженными параллельными пластинами равна 100 В, расстояние между пластинами 2 см. Определите напряжённость электрического поля между пластинами.

49.7. Напряжённость однородного электрического поля 30 В/м. Чему равна разность потенциалов между точками электрического поля, расположенными на одной линии напряжённости на расстоянии 30 см друг от друга?

49.8*. Ускоряющая разность потенциалов в электронно-лучевой трубке $\Delta\varphi = 1{,}5$ кВ, расстояние от отклоняющих пластин до экрана $L = 30$ см. На какое расстояние сместится пятно на экране осциллографа при подаче на отклоняющие пластины разности потенциалов $U = 20$ В? Расстояние между пластинами $d = 0{,}5$ см, длина каждой пластины $l = 2{,}5$ см.

Зарядите изготовленный вами алюминиевый цилиндр, поднесите к массивному металлическому телу и коснитесь его. Окажется ли тело заряженным? Объясните почему.

Вспомните, наблюдали ли вы аналогичный эффект, заключающийся в искрении вашей одежды при соприкосновении с массивными металлическими предметами.

1. Механизм образования разряда молнии.
2. Назначение и конструкция громоотвода.

§ 50. Проводники и диэлектрики в электрическом поле

Повторите: электризация, вещество, ионы.

Электризация тел без непосредственного контакта.

ЗАПОМНИТЕ **Проводниками** называются такие материалы, в которых имеются свободные носители электрических зарядов.

Примерами могут служить металлические тела в твёрдом и в жидком состоянии, жидкие растворы и расплавы электролитов.

Проводимость металлов обнаруживается, если соединить с помощью металлической проволоки заряженный электрометр с незаряженным (рис. 4.29). Опыт показывает, что по металлической проволоке часть зарядов с первого электрометра переходит на второй (рис. 4.30).

Наличие свободных электрических зарядов в проводниках можно обнаружить в следующих опытах. Установим на острие металлическую трубку. Соединив проводником трубку со стержнем электрометра, убедимся в том, что трубка не имеет электрического заряда.

Теперь наэлектризуем эбонитовую палочку и поднесём к одному концу трубки. Трубка поворачивается на острие, притягиваясь к заряженной палочке (рис. 4.31). Следовательно, на том конце трубки, который расположен ближе к эбонитовой палочке, появился электрический заряд, противоположный по знаку заряду палочки.

По закону сохранения электрического заряда на теле, если нет передачи заряда от других тел, не может появиться электрический заряд одного знака. Если на одной части проводника под действием электрического поля заряженной палочки появился положительный электрический заряд, то на другой его части должен появиться равный по модулю отрицательный электрический заряд. Проверим это на опыте.

Поместим в электрическое поле два соединённых одинаковых металлических диска (рис. 4.32, *а*) и разведём в электрическом поле их на некоторое расстояние друг от друга (рис. 4.32, *б*). Затем каждый диск вынесем из поля и соединим поочерёдно со стержнем электрометра. После прикосновения к электрометру первого диска стрелка электрометра отклоняется, после прикос-



Рис. 4.29



Рис. 4.30



Рис. 4.31

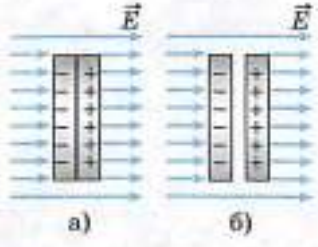


Рис. 4.32

новения второго диска стрелка возвращается к нулевому делению шкалы. Таким образом, опыт доказывает, что

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ две части металлического тела, разделённого в электрическом поле, приобретают под действием поля электрические заряды, равные по модулю и противоположные по знаку.

Электрическое поле внутри проводящего шара. При внесении проводника в электрическое поле свободные заряды в нём приходят в движение, которое прекращается, когда напряжённость поля внутри проводника становится равной нулю. В том, что внутри проводника, помещённого в электростатическое поле, электрическое поле отсутствует, можно убедиться на опыте.

При поднесении заряженного тела к стержню электрометра его стрелка отклоняется, так как электрическое поле вызывает разделение зарядов в стержне (рис. 4.33).

Накроем стержень электрометра полым металлическим шаром и вновь поднесём заряженное тело. Теперь стрелка электрометра не отклоняется (рис. 4.34). Следовательно,



Рис. 4.33



Рис. 4.34

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ электрическое поле внутри полого металлического шара отсутствует.

Распределение зарядов в проводящих телах. Если наэлектризовать проводящее тело, то силы отталкивания, действующие между одноимёнными зарядами, выталкивают их на поверхность тела. Покинуть поверхность проводника свободные электрические заряды не могут, так как на них действуют кулоновские силы притяжения зарядов противоположного знака, имеющихся в проводнике.

Свободные заряды перестают перемещаться вдоль поверхности проводящего тела при достижении такого их распределения, при котором вектор напряжённости электрического поля в любой точке перпендикулярен поверхности тела. Поэтому в электрическом поле поверхность проводящего тела любой формы является эквипотенциальной поверхностью.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Все точки внутри проводника имеют одинаковый потенциал, равный потенциалу на его поверхности.

Электрическое поле заряженного проводящего шара. Так как поверхность проводника эквипотенциальна, линии напряжённости электрического поля заряженного проводящего шара выходят из поверхности шара перпендикулярно ей. Если заряд на поверхности шара равен q, то электрическое поле вне шара такое же, как и поле точечного заряда q, находящегося в центре проводящего шара.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Внутри проводящего шара напряжённость электрического поля равна нулю.

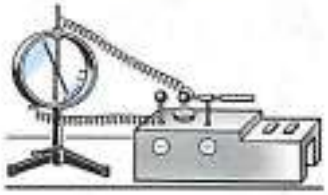


Рис. 4.35

Измерение разности потенциалов с помощью электрометра. Так как поверхность любого проводника является эквипотенциальной поверхностью, то при соединении проводником стержня электрометра с одним заряженным телом, а корпуса электрометра с другим телом разность потенциалов между стержнем и корпусом электрометра будет равна разности потенциалов между телами, с которыми они соединены (рис. 4.35). На заряженную стрелку электрометра действует сила, прямо пропорциональная заряду стрелки и напряжённости электрического поля, в котором эта стрелка находится. Напряжённость электрического поля пропорциональна разности потенциалов между стержнем и корпусом электрометра. Заряд на стрелке также пропорционален разности потенциалов между стрелкой и корпусом. Поэтому сила, действующая на стрелку, пропорциональна квадрату разности потенциалов между стержнем и корпусом электрометра.

Соединяя стержень и корпус электрометра проводниками с различными телами, можно по отклонению стрелки электрометра определить разность потенциалов между телами. Соединив проводником стержень электрометра с заряженным проводящим телом, а корпус электрометра с землёй, можно измерить разность потенциалов между поверхностью заряженного тела и землёй. Опыт показывает, что при соединении стержня электрометра с различными точками поверхности проводящего тела показания электрометра остаются неизменными (рис. 4.36). Следовательно,

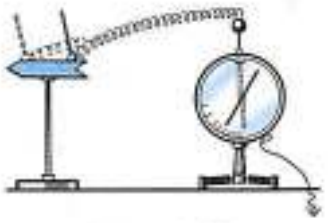


Рис. 4.36

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ поверхность проводящего тела является эквипотенциальной поверхностью.

Поляризация диэлектриков.

ЗАПОМНИТЕ **Диэлектриками**, или **изоляторами**, называются вещества, в которых нет свободных электрических зарядов.

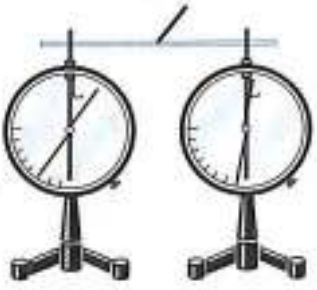


Рис. 4.37

К диэлектрикам относятся воздух, стекло, плексиглас, эбонит, слюда, фарфор. Соединив заряженный электрометр с незаряженным с помощью стеклянной трубки, можно убедиться, что электрические заряды от одного электрометра к другому по стеклу не переходят (рис. 4.37).

Исследуем свойства диэлектриков в электрическом поле. Выполним с пластмассовой трубкой такой же опыт, как и с металлической трубкой и заряженной палочкой. Опыт показывает, что незаряженные диэлектрики притягиваются к заряженным телам подобно тому, как это происходит с проводниками. Однако при разделении тела из диэлектрика в электрическом поле на две части каждая из них оказывается нейтральной. Следовательно, в диэлектрике разделение зарядов не происходит, так как в нём нет свободных зарядов. Чем же объяснить притяжение диэлектрика к заряженному телу?

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Оказывается, в электрическом поле происходит *поляризация диэлектрика*, т. е. смещение в противоположные стороны разноимённых зарядов, входящих в состав атомов и молекул вещества.

На поверхности диэлектрика возникают связанные заряды, неспособные свободно перемещаться по диэлектрику в отличие от свободных зарядов в проводниках.

Вектор напряжённости $\vec{E}_п$ электрического поля, создаваемого связанными зарядами на поверхности диэлектрика, направлен внутри диэлектрика противоположно вектору напряжённости $\vec{E}_0$ внешнего электрического поля, вызывающего поляризацию (рис. 4.38). Напряжённость электрического поля внутри бесконечного пространства, полностью заполненного диэлектриком, оказывается равной $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_п$, или по модулю $E = E_0 - E_п$.



Рис. 4.38

ЗАПОМНИТЕ Физическая величина, равная отношению модуля напряжённости $\vec{E}_0$ однородного электрического поля в вакууме к модулю напряжённости $\vec{E}$ электрического поля в однородном диэлектрике, заполняющем это поле, называется **диэлектрической проницаемостью вещества:**

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}.$$

Многие диэлектрики состоят из неполярных атомов или молекул. В них внутримолекулярные заряды расположены симметрично, так что центр положительно заряженного ядра совпадает с центром отрицательного электрического заряда электронной оболочки (рис. 4.39, *а*). В электрическом поле центр электрического заряда электронной оболочки смещается относительно положительно заряженного ядра, так как силы, приложенные к ядру и оболочке, противоположно направлены. В результате смещения центра отрицательного заряда относительно центра положительного заряда атом становится *диполем* (рис. 4.39, *б*).

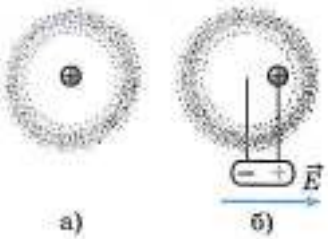


Рис. 4.39

Эти диполи в электрическом поле располагаются вдоль линий напряжённости и обращены своими отрицательно заряженными концами к той поверхности, в которую входят линии напряжённости внешнего поля. На поверхностях образца, перпендикулярных линиям напряжённости, остаются нескомпенсированными заряды концов крайних диполей. Они и создают поверхностные (поляризационные) заряды (связанные заряды) и поле, напряжённость $\vec{E}_п$ которого уменьшает напряжённость внешнего поля внутри диэлектрика. Рассмотренный механизм *электронной поляризации* является универсальным, поскольку смещение электронных оболочек происходит в атомах, молекулах или ионах любого диэлектрика.

Другой разновидностью деформационной поляризуемости является *ионная поляризация*. Кристаллические решётки многих ионных диэлектриков типа NaCl можно рассматривать как состоящие из двух подрешёток, каждая из которых образована ионами одного знака, вставленных одна в другую. В отсутствие электрического поля каждая кристаллическая ячейка и кристалл в целом нейтральны и неполярны. Во внешнем электрическом поле ионы подрешёток смещаются относительно друг друга в противоположных направлениях, вследствие чего на противоположных гранях кристалла будут преобладать ионы одного знака, т. е. кристалл в целом поляризуется.

Ионная поляризация в чистом виде не наблюдается, ей всегда сопутствует электронная поляризация.

Многие диэлектрики (H_2O, H_2S, NO_2) образованы из молекул, каждая из которых является электрическим диполем.

ЗАПОМНИТЕ Молекулы, которые можно рассматривать как электрические диполи, и образованные такими молекулами диэлектрики называются **полярными**.

При отсутствии внешнего электрического поля молекулярные диполи из-за теплового движения расположены хаотично. Когда полярный диэлектрик попадает в электрическое поле, происходит поворот его молекулярных диполей в таком направлении, чтобы их оси совпадали с направлением линий напряжённости. Но этому препятствует тепловое движение. В результате система полярных молекул в среднем приобретает некоторую преимущественную ориентацию и диэлектрик в целом поляризуется. Такой механизм поляризации называют *ориентационным*.

Если диэлектрик находится в переменном электрическом поле, то он периодически переполяризуется. Повороты полярных молекул и сдвиги ионов в решётке усиливают тепловое движение и приводят к повышению температуры вещества. Потери электрической энергии на нагревание диэлектрика называют *диэлектрическими потерями*. В реальных диэлектриках имеется дополнительный источник потерь: нагревание их токами проводимости.

При достаточно большой частоте переменного тока полярные молекулы не успевают ориентироваться, а ионы — смещаться. Поэтому у полярных диэлектриков и у диэлектриков с ионной решёткой увеличение частоты вызывает уменьшение поляризуемости и диэлектрической проницаемости. Этого не наблюдается у диэлектриков с чисто электронным механизмом поляризации.

Проводники. Диэлектрики. Поляризация диэлектриков. Диэлектрическая проницаемость вещества. Электронная поляризация. Ионная поляризация

1. В чём заключается явление электризации проводников в электрическом поле? 2. Почему напряжённость электростатического поля внутри проводника равна нулю? 3. Какой опыт доказывает отсутствие электрического поля внутри проводника? 4. Почему поверхность заряженного проводника является эквипотенциальной поверхностью? 5. Докажите, что внутри проводника все точки имеют одинаковый потенциал, равный потенциалу на поверхности этого проводника. 6. Докажите, что электрическое поле вне заряженного уединённого проводящего шара такое же, как и поле точечного заряда в его центре. 7. Почему незаряженные куски диэлектрика притягиваются к заряженным телам? 8. Каковы механизмы поляризации диэлектриков? 9. Что называется диэлектрической проницаемостью?

ЗАДАЧА 1. В пространство между параллельными металлическими пластинами *1* и *2* с разноимёнными зарядами q и $-q$ вносят незаряженную металлическую пластину *3*. Какой заряд q появится на одной из поверхностей пластины *3*?

Решение. Движение свободных электронов в пластине *3* будет происходить до тех пор, пока напряжённость электрического поля внутри пластины не станет равной нулю. Это значит, что вектор напряжённости $\vec{E}'$ однородного поля, создаваемого зарядами $\pm q$, появившимися на поверхности пластины *3*, равен по модулю и противоположен по направлению вектору напряжённости $\vec{E}$ электрического поля заряженных пластин *1* и *2*.

Напряжённость электрического поля между пластинами *1* и *2* равна по модулю: $E = E_1 + E_2 = \frac{|q_1|}{2S\varepsilon_0} + \frac{|q_2|}{2S\varepsilon_0} = \frac{|q_1| + |q_2|}{2S\varepsilon_0}$.

Напряжённость электрического поля от зарядов на пластине *3* внутри пластины равна $E' = \frac{|q|}{2S\varepsilon_0}$. Так как $E = E'$, то $\frac{|q_1| + |q_2|}{2S\varepsilon_0} = \frac{|q|}{\varepsilon_0 S}$, откуда $|q| = \frac{|q_1| + |q_2|}{2}$.

ЗАДАЧА 2. Металлический шар радиусом r укреплён на изолирующей подставке и имеет положительный электрический заряд q. Определите потенциал этого шара, если он окружён заземлённой сферической оболочкой радиусом R (рис. 4.40).

Решение. Потенциал φ шара равен сумме потенциалов φ_1 и φ_2 электрических полей зарядов на поверхности шара и на оболочке. Так как оболочка заземлена, напряжённость электрического поля вне оболочки равна нулю. Это значит, что на оболочке появляется электрический заряд $-q$, равный по модулю заряду на шаре (рис. 4.41). Найдём потенциалы электрических полей, создаваемых зарядами на поверхности шара и на оболочке:

$$\varphi_1 = \frac{|q|}{4\pi\varepsilon_0 r}, \quad \varphi_2 = -\frac{|q|}{4\pi\varepsilon_0 R}.$$



Рис. 4.40

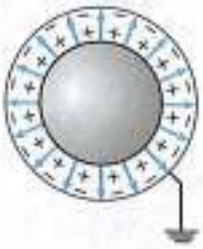


Рис. 4.41

Тогда потенциал φ шара равен:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = \frac{|q|}{4\pi\varepsilon_0 r} - \frac{|q|}{4\pi\varepsilon_0 R} = \frac{|q|}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{R-r}{Rr}\right).$$

ЗАДАЧА 3. На каком расстоянии от маленького заряженного шара напряжённость электрического поля в воде с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 81$ будет такой же, как и в вакууме на расстоянии $r_1 = 18$ см от центра шара?

Решение. Так как напряжённость поля одинакова ($E_1 = E_2$), то

$$\frac{|q|}{4\pi\varepsilon_0 r_1^2} = \frac{|q|}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_2^2}.$$

Отсюда следует:

$$r_2 = r_1\sqrt{\frac{1}{\varepsilon}} = 0{,}18\sqrt{\frac{1}{81}}\ \text{(м)} = 0{,}02\ \text{м} = 2\ \text{см}.$$

РЕШИТЕ 50.1. Внутрь незаряженной металлической сферы на изолирующей подставке вносится заряженный металлический шарик так, как показано на рисунках 4.42 и 4.43. Будет ли существовать электрическое поле внутри сферы и вне её?



Рис. 4.42



Рис. 4.43

50.2. Напряжённость электрического поля на расстоянии 1 см от поверхности заряженного проводящего шара радиусом 3 см равна 1000 В/м. Определите заряд шара и напряжённость электрического поля на расстоянии 2 см от центра шара.

Поднесьте на нити деревянную линейку. Поднесите к ней заряженное тело. Что вы наблюдаете? Почему?

Электризация в животном мире.

§ 51. Электрическая ёмкость

Повторите: электрическое поле, электрический заряд.

Ёмкость конденсатора. Для накопления значительного количества разноимённых электрических зарядов применяются *конденсаторы*.

ЗАПОМНИТЕ **Конденсатор** — это система из двух проводников (обкладок), разделённых диэлектриком, толщина которого мала по сравнению с линейными размерами проводников.
Две плоские металлические пластины, расположенные параллельно и разделённые слоем диэлектрика, образуют **плоский конденсатор.**

Если пластинам плоского конденсатора сообщить равные по модулю заряды противоположного знака, то напряжённость электрического поля между пластинами будет в два раза больше, чем напряжённость поля у одной пластины:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0}, \qquad (51.1)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего пространство между пластинами (см. формулу (47.6)).

ЗАПОМНИТЕ Физическая величина, определяемая отношением заряда q одной из пластин конденсатора к разности потенциалов $\Delta\varphi$ между обкладками конденсатора, называется **электроёмкостью конденсатора:**

$$C = \frac{q}{(\varphi_1 - \varphi_2)}. \qquad (51.2)$$

Единица электроёмкости. Единица электроёмкости в СИ — фарад (сокращённо: Ф). Ёмкостью в 1 Ф обладает такой конденсатор, разность потенциалов между обкладками которого равна 1 В при сообщении обкладкам разноимённых зарядов по 1 Кл:

$$1\ \text{Ф} = 1\ \text{Кл}/1\ \text{В}.$$

Ёмкость плоского конденсатора. Формулу для вычисления электроёмкости плоского конденсатора можно получить, используя выражение (51.1). В самом деле, напряжённость поля

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0 S},$$

где S — площадь пластины. Поскольку поле однородное, то разность потенциалов между обкладками конденсатора равна:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = Ed = \frac{qd}{\varepsilon\varepsilon_0 S},$$

где d — расстояние между обкладками. Подставив это уравнение в формулу (51.2), получим выражение для электроёмкости плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}. \qquad (51.3)$$



Рис. 4.44

Устройство и типы конденсаторов. Выражение (51.3) показывает, что электроёмкость конденсатора можно увеличить путём увеличения площади S каждой его обкладки, уменьшения расстояния d между ними и применения диэлектриков с большими значениями диэлектрической проницаемости ε.

В целях экономии материалов металлические электроды конденсаторов обычно изготавливаются в виде тонкой фольги. В качестве изолирующей прокладки используются парафинированная бумага, полистирол, слюда, керамика, воздух. По типу используемого диэлектрика конденсаторы называются *бумажными, слюдяными, полистирольными, керамическими, воздушными.*

Бумажный конденсатор изготавливают из двух полос металлической фольги, изолированных друг от друга полосами парафинированной бумаги. Полосы фольги и бумагу сворачивают в рулон и помещают в металлический или фарфоровый корпус. Через специальные изоляторы от листов фольги делают два вывода для включения конденсатора в электрическую цепь (рис. 4.44).

Аналогичное устройство имеют и конденсаторы других типов.

Все перечисленные типы конденсаторов можно включать в электрическую цепь, не обращая внимания на полярность.

Но есть *электролитические* конденсаторы, которые необходимо включать в цепь с учётом полярности. Слоем изолятора в электролитическом конденсаторе служит тонкая плёнка оксида алюминия на алюминиевой фольге, помещённой в электролит. Малая толщина плёнки алюминия позволяет изготавливать электролитические конденсаторы большой электроёмкости при малых размерах обкладок. Необходимость соблюдения полярности включения электролитических конденсаторов объясняется тем, что плёнка оксида алюминия является хорошим изолятором лишь при одном направлении вектора напряжённости электрического поля между обкладками конденсатора. Изменение направления вектора напряжённости приводит к значительному уменьшению электрического сопротивления изолирующего слоя. Электрический ток, проходящий через конденсатор, вызывает его разогревание. При достаточно большой разности потенциалов происходит разрушение слоя изолятора, наступает пробой конденсатора.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Электролитические конденсаторы нельзя включать в цепь переменного тока.

Ионистор — это сравнительно новый тип конденсаторов, идея которых была предложена в 1957 г. Однако они не были востребованы и поэтому не получили широкого применения. В настоящее время их успешно используют вместо батареек, если нужно сохранить какую-либо информацию о параметрах какого-либо устройства (например, ПК) при отсутствии внешнего питания. Ионистор — это комбинация конденсатора с электрохимической батаре-

ей, за счёт чего он может накапливать электрическую энергию. Ионисторы отличаются от других конденсаторов большой ёмкостью (несколько фарад), которая обеспечивается существенным увеличением площади обкладок.

Наряду с конденсаторами постоянной электроёмкости в практике применяются конденсаторы переменной электроёмкости. В этих конденсаторах электроёмкость регулируется изменением взаимного положения пластин. При увеличении площади пластин, находящихся друг против друга, электроёмкость увеличивается, при уменьшении уменьшается (рис. 4.45).



Рис. 4.45

Конденсатор. Электроёмкость. Ионистор

1. Для чего предназначены конденсаторы? 2. Как устроен конденсатор? 3. Что называется электроёмкостью конденсатора? 4. В каких единицах выражается электроёмкость? 5. От чего зависит электроёмкость конденсатора? 6. Для чего пространство между обкладками конденсатора заполняется диэлектриком? 7. Чем отличаются электролитические конденсаторы от конденсаторов других типов? Почему при их включении надо учитывать полярность? 8. Как устроен конденсатор переменной электроёмкости?

ЗАДАЧА 1. Чему равна сила притяжения между пластинами плоского воздушного конденсатора, площадь каждой из которых S, а напряжённость электрического поля между ними E?

Решение. Каждая из пластин конденсатора создаёт электрическое поле, напряжённость которого $\vec{E}_1$ равна по модулю

$$E_1 = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} = \frac{q}{2\varepsilon_0 S},$$

где q — модуль заряда на каждой обкладке конденсатора.

Пластины притягиваются с силой $\vec{F}_0$, равной по модулю

$$F_0 = E_1 q = \frac{q^2}{2\varepsilon_0 S}.$$

Напряжённость электрического поля конденсатора равна:

$$E = \frac{q}{\varepsilon_0 S}, \text{ откуда } q = E\varepsilon_0 S.$$

Исключая значение q в выражении для модуля силы $\vec{F}_0$, получаем

$$F_0 = \frac{E^2 \varepsilon_0^2 S^2}{2\varepsilon_0 S} = \frac{\varepsilon_0 S E^2}{2} = \frac{\varepsilon_0 S \Delta\varphi^2}{2d^2}.$$

ЗАДАЧА 2. Как изменится сила притяжения между пластинами конденсатора, если пространство между пластинами заполнить жидким диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ε?

Решение. Возможны два случая.

1. Если конденсатор после зарядки отключён от источника тока, то величиной, не изменяющейся при заполнении диэлектриком пространства между обкладками, будет электрический заряд на его пластинах, а напряжённость поля окажется меньше в ε раз:

$$E_1 = \frac{q}{2\varepsilon\varepsilon_0 S}.$$

Следовательно, сила взаимодействия пластин

$$F = E_1 q = \frac{q^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon S} = \frac{F_0}{\varepsilon},$$

т. е. при заполнении пространства диэлектриком она уменьшится в ε раз.

2. Если конденсатор подключён к источнику тока, то разность потенциалов между его обкладками при заполнении диэлектриком не изменяется.

Подставив в формулу $F = \frac{q^2}{2\varepsilon\varepsilon_0 S}$ значение $q = C\Delta\varphi = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S\Delta\varphi}{d}$, получим

$$F = \frac{\varepsilon^2\varepsilon_0^2 S^2 \Delta\varphi^2}{d^2 2\varepsilon\varepsilon_0 S} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S\Delta\varphi^2}{2d^2} = \varepsilon F_0.$$

Из этого выражения следует, что сила взаимодействия обкладок конденсатора при заполнении конденсатора диэлектриком возрастёт в ε раз.

ЗАДАЧА 3. Определите электроёмкость двух конденсаторов $C1$ и $C2$, соединённых параллельно и последовательно.

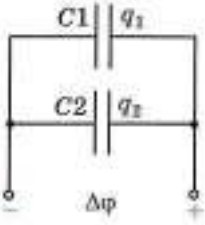


Рис. 4.46

Решение. При параллельном соединении конденсаторов (рис. 4.46) разность потенциалов одинакова для обоих конденсаторов: $\Delta\varphi = \text{const}$, а заряд батареи конденсаторов $q = q_1 + q_2$.

Электроёмкость двух параллельно соединённых конденсаторов равна:

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} = \frac{q_1 + q_2}{\Delta\varphi}.$$

Учитывая, что $q_1 = C_1\Delta\varphi$, $q_2 = C_2\Delta\varphi$, получаем

$$\boxed{C = C_1 + C_2.}$$

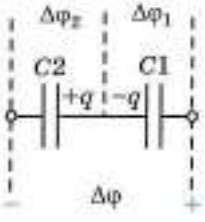


Рис. 4.47

При последовательном соединении конденсаторов (рис. 4.47) их заряды одинаковы, так как на соединённых пластинах суммарный заряд равен нулю.

Разность потенциалов на батарее конденсаторов равна сумме разностей потенциалов на каждом конденсаторе: $\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2$.

Но $\Delta\varphi = \frac{q}{C}$, $\Delta\varphi_1 = \frac{q}{C_1}$, $\Delta\varphi_2 = \frac{q}{C_2}$. Поэтому

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2},$$

РЕШИТЕ

51.1. При разности потенциалов между пластинами конденсатора, равной 100 В, модуль заряда на пластинах равен $2 \cdot 10^{-4}$ Кл. Чему равна электроёмкость конденсатора?

51.2. Площадь пластины плоского конденсатора 1 м^2, его электроёмкость 1 мкФ. Между пластинами находится слой диэлектрика толщиной 0,1 мм. Чему равна диэлектрическая проницаемость диэлектрика?

51.3. На обкладках плоского воздушного конденсатора находятся разноимённые электрические заряды, по модулю равные 10^{-5} Кл. Чему равна разность потенциалов между обкладками, если площадь каждой пластины 100 см^2, а расстояние между пластинами 0,9 мм?

51.4. Воздушный конденсатор подключён к источнику постоянного тока. Как изменятся заряд на обкладках конденсатора и разность потенциалов между ними при заполнении пространства между его пластинами диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ε?

51.5. Воздушный конденсатор электроёмкостью 500 пФ заряжен до разности потенциалов 200 В и отключён от источника тока. Какими станут электрический заряд на пластине конденсатора и разность потенциалов между его пластинами при погружении в дистиллированную воду с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 81$?

1. Ионистор, принцип работы, преимущества и недостатки.
2. Сравнение конденсаторов разных типов.

§ 52. Энергия электрического поля

Повторите: энергия электрического поля, конденсатор.

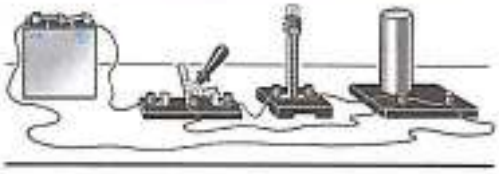


Рис. 4.48

Энергия заряженного конденсатора. Зарядим конденсатор и затем подключим к его выводам электрическую лампу (рис. 4.48). При подключении лампы наблюдается кратковременная вспышка света. За счёт какой энергии произошло нагревание спирали лампы, излучение света?

Суммарный электрический заряд на пластинах конденсатора перед началом опыта был равен нулю, он остался равным нулю и в конце опыта, когда исчезло электрическое поле между его обкладками. Единственное изменение, которое произошло при разрядке конденсатора, — это исчезновение электрического поля между его обкладками.

Следовательно, электрическое поле обладает энергией, за счёт которой и произошла вспышка.

Если на обкладках конденсатора электроёмкостью C находятся одинаковые по модулю электрические заряды, то разность потенциалов между обкладками конденсатора $\Delta\varphi_0 = q_0/C$.

В процессе разрядки конденсатора разность потенциалов между его обкладками убывает прямо пропорционально заряду q от первоначального значения $\Delta\varphi_0$ до нуля. Среднее значение разности потенциалов в процессе разрядки равно:

$$\Delta\varphi_{ср} = \frac{\Delta\varphi_0}{2} = \frac{q_0}{2C}.$$

Для работы A, совершаемой электрическим полем при разрядке конденсатора, будем иметь

$$A = q_0\Delta\varphi_{ср} = \frac{q_0\Delta\varphi_0}{2} = \frac{C\Delta\varphi_0^2}{2}.$$

Изменение энергии электрического поля равно работе, которая совершена при разрядке конденсатора:

$$\Delta W_э = W_0 - 0 = A = \frac{C\Delta\varphi_0^2}{2} = \frac{q_0^2}{2C} = \frac{q_0\Delta\varphi_0}{2}.$$

Следовательно, энергия $W_э$ электрического поля конденсатора электроёмкостью C, заряженного до разности потенциалов $\Delta\varphi$, равна:

$$W_э = \frac{q^2}{2C} = \frac{q\Delta\varphi}{2} = \frac{C\Delta\varphi^2}{2}. \qquad (52.1)$$

Подставив в формулу (52.1) выражение электроёмкости плоского конденсатора (см. формулу (51.3)) и выразив разность потенциалов через напряжённость поля, получим

$$W_э = \frac{C\Delta\varphi^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{2d} E^2 d^2 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} Sd.$$

Разделив обе части уравнения на объём $V = Sd$, занятый электрическим полем внутри конденсатора, получим

$$w_э = \frac{W_э}{V} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}. \qquad (52.2)$$

Величина $w_э = W_э/V$ имеет смысл плотности энергии электрического поля, т. е. энергии, содержащейся в единице объёма. Итак,

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ плотность энергии электрического поля пропорциональна квадрату напряжённости.

Этот вывод справедлив для электрических полей любой конфигурации, а не только для однородного поля.

Впервые понятие плотности энергии электрического поля ввёл Дж. Максвелл. В отличие от сторонников теории дальнодействия, считавших, что энергия концентрируется на заряженных телах, Максвелл исходил из полевых представлений. Он полагал, что энергия электрического поля рассредоточена по всему объёму с плотностью, выражающейся формулой (52.2).

Энергия заряженного конденсатора

1. Опишите опыт, доказывающий, что электрическое поле между обкладками заряженного конденсатора обладает энергией. 2. Чему равна энергия заряженного конденсатора? 3. Чему равна плотность энергии электрического поля?

ЗАДАЧА 1. Плоский конденсатор с диэлектриком электроёмкостью $C_0 = 12$ мкФ заряжен до напряжения $U_0 = 400$ В и отключён от источника тока. Определите работу, которую нужно совершить, чтобы удалить диэлектрик из конденсатора. Диэлектрическая проницаемость диэлектрика $\varepsilon = 2$. Силу трения диэлектрика о пластины конденсатора не учитывайте.

Решение. Работа силы по удалению диэлектрика равна разности энергий конденсатора конечного и начального состояний конденсатора:

$$A = W_к - W_н,$$

где $W_н = \frac{C_0 U_0^2}{2}$ — энергия конденсатора с диэлектриком; $W_к = \frac{CU^2}{2}$ — энергия конденсатора без диэлектрика; $C = \frac{C_0}{\varepsilon}$ — электроёмкость конденсатора без диэлектрика.

Так как конденсатор был отключён от источника тока, то заряд на его обкладках сохраняется: $q_1 = q_2 = C_0 U_0 = CU$, откуда $U = \frac{C_0 U_0}{C} = \varepsilon U_0$.

Следовательно, искомая работа

$$A = \frac{CU^2}{2} - \frac{C_0U_0^2}{2} = \frac{C_0\varepsilon^2U_0^2}{\varepsilon 2} - \frac{C_0U_0^2}{2} = \frac{C_0U_0^2}{2}(\varepsilon - 1) = 0{,}96 \text{ Дж}.$$

ЗАДАЧА 2. Заряженный конденсатор ёмкостью C и зарядом q подключили параллельно к другому незаряженному конденсатору такой же ёмкости. Сравните энергию электрического поля системы конденсаторов до и после подключения. Объясните полученный результат.

Решение. Начальная энергия системы конденсаторов равна:

$$W_1 = \frac{q^2}{2C} + 0 = \frac{q^2}{2C}.$$

После параллельного подключения второго конденсатора произойдёт перераспределение зарядов между ними. В соответствии с законом сохранения заряда при одинаковой электроёмкости конденсаторов и одинаковой разности потенциалов на их обкладках будут одинаковыми и заряды на них:

$$q_1 = q_2 = q/2.$$

После соединения конденсаторов их энергия будет равна:

$$W_2 = \frac{q_1^2}{2C} + \frac{q_2^2}{2C} = \frac{(q/2)^2}{2C} + \frac{(q/2)^2}{2C} = \frac{q^2}{4C}.$$

Мы видим, что половина энергии электрического поля как бы исчезла: $W_2 = W_1/2$. Уменьшение энергии конденсатора связано с тем, что часть энергии электрического поля пошла на нагрев проводов и излучение электромагнитных волн. Причём результат не зависит от электрического сопротивления проводов.

РЕШИТЕ

52.1. Вычислите энергию электрического поля конденсатора электроёмкостью 10 мкФ, заряженного до разности потенциалов 10 В.

52.2. Воздушный конденсатор электроёмкостью 250 пФ подключён к источнику постоянной разности потенциалов 100 В. Вычислите энергию конденсатора. Как изменится энергия конденсатора при заполнении пространства между пластинами веществом с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 20$?

52.3. Плоский конденсатор с диэлектриком, заряженный до разности потенциалов 3 кВ, разряжается через проводник. Площадь пластин конденсатора 0,25 м^2, расстояние между ними 3 мм, диэлектрическая проницаемость диэлектрика $\varepsilon = 10$. Определите количество теплоты, выделяющейся в проводнике.

52.4. Шар радиусом 20 см, несущий заряд 50 нКл, заземлили. Определите количество теплоты, выделившейся при этом, если вся запасённая в заряженном шаре энергия перешла в тепло.

Понаблюдайте, что происходит между электродами электрической машины на столе учителя.

Лейденская банка.

§ 53*. Применение диэлектриков

Повторите: диэлектрики, поляризация.

Спонтанная поляризация. Если в ионном кристалле центры положительного и отрицательного зарядов ионов, расположенных в одной элементарной ячейке, не совпадают, то каждая элементарная ячейка такого кристалла может рассматриваться как диполь, т. е. система из двух точечных разноимённых зарядов, равных по модулю. До тех пор пока энергия взаимодействия таких диполей превышает среднюю энергию теплового движения частиц, отдельные микроскопические области кристалла могут быть самопроизвольно, или, как принято говорить, спонтанно, поляризованными.

ЗАПОМНИТЕ Спонтанно поляризованные микроскопические области кристаллов называются **доменами**.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ В доменах диполи элементарных ячеек ориентированы одинаково, а сами домены ориентированы хаотично (рис. 4.49).

На поверхности кристалла чередуются положительно и отрицательно заряженные участки, и кристалл в целом не создаёт в окружающем пространстве электрического поля.

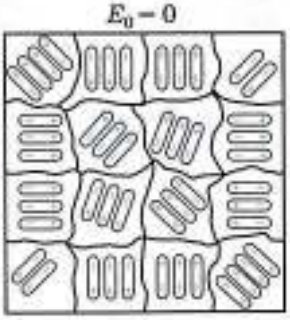


Рис. 4.49

Сегнетоэлектрики.

ЗАПОМНИТЕ Кристаллы, обладающие в некотором температурном интервале спонтанной поляризацией, называют **сегнетоэлектриками**.

Основные свойства сегнетоэлектриков впервые были изучены в 1930-х гг. И. В. Курчатовым и П. П. Кобеко на кристаллах сегнетовой соли. Впоследствии было открыто и исследовано около 80 сегнетоэлектриков. Наиболее интересным для практических применений является титанат бария $BaTiO_3$, открытый в 1944 г. Б. М. Вулом.

Внесение сегнетоэлектрика в электрическое поле приводит к тому, что в части его доменов все диполи ориентируются вдоль линий напряжённости (рис. 4.50).



Рис. 4.50

Вследствие того что в сегнетоэлектриках происходит ориентация целых макроскопических областей — *доменов*, а не отдельных молекулярных диполей, сегнетоэлектрики обладают большой диэлектрической проницаемостью. Сегнетоэлектрические материалы, обладающие высокими значениями диэлектрической проницаемости (порядка 10^3—10^4), применяют для изготовления малогабаритных конденсаторов.

Точка Кюри. Для сегнетоэлектриков характерно наличие предельной температуры — *точки Кюри*.

ЗАПОМНИТЕ **Точкой Кюри** называется предельная температура, выше которой спонтанная поляризация исчезает и сегнетоэлектрик становится обычным диэлектриком.

Точка Кюри для титаната бария близка к температуре 120 °С. Переход через точку Кюри сопровождается резким изменением диэлектрической проницаемости. Это обусловлено тем, что при температуре Кюри происходит перестройка кристаллической структуры.

ИНТЕРЕСНО **Пьезоэлектрический эффект.** Если подвергнуть образец сегнетоэлектрика одностороннему сжатию вдоль направления остаточной поляризации, то размеры образца и каждой элементарной ячейки в этом направлении уменьшатся. При этом уменьшатся расстояния между центрами положительного и отрицательного зарядов в каждой ячейке и остаточная поляризация в целом. В результате изменится разность потенциалов между гранями образца, перпендикулярными направлению силы. При растяжении образца остаточная поляризация и соответствующая ей поверхностная плотность зарядов на гранях увеличиваются, что приводит к возникновению разности потенциалов противоположного знака.

Явление возникновения поляризационных зарядов при деформации кристалла называют *прямым пьезоэлектрическим эффектом*. Он был открыт в 1880 г. братьями Пьером и Жаком Кюри на несегнетоэлектрическом материале — кварце. Все сегнетоэлектрики являются пьезоэлектриками, но далеко не все пьезоэлектрики обладают сегнетоэлектрическими свойствами.

Существует и *обратный пьезоэффект* — деформация пьезоэлектрика, помещённого в электрическое поле. Обратный пьезоэффект объясняется тем, что под действием электрического поля элементарные ячейки удлиняются или укорачиваются, а это приводит к макроскопической деформации образца. Деформация пропорциональна приложенной разности потенциалов.

Прямой и обратный пьезоэффекты широко применяют в практике для преобразования механических колебаний в электрические и наоборот. Пьезоэлектрический элемент находится в пьезоэлектрических микрофонах и телефонах, в эхолотах, в гидролокаторах, в тензометрах (измерителях давлений и механических напряжений) и т. п.

Спонтанная поляризация. Сегнетоэлектрики. Точка Кюри. Пьезоэлектрический эффект

1. Что такое сегнетоэлектрики и где их применяют? 2. Что такое точка Кюри? 3*. В чём заключается пьезоэлектрический эффект (прямой и обратный)? 4*. Какое применение находит пьезоэлектрический эффект?

Мария Кюри и её открытия.

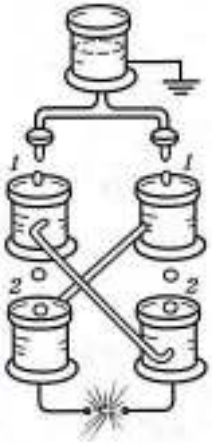
ОТВЕТЬТЕ НА ИТОГОВЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ

1. Опишите возможные способы получения электрического заряда.
2. Сравните свойства электрического и гравитационного полей.
3. Из какого принципа исходил Ш. Кулон при описании взаимодействия зарядов?
4. Оцените силы гравитационного и электростатического взаимодействий. Сравните их между собой.
5. Сравните силовые и энергетические характеристики электрического поля.
6. Каким образом можно графически изобразить электрическое поле?
7. Как называется поверхность, имеющая в каждой точке одинаковые потенциалы?
8. Рассмотрите напряжённость и потенциал металлического и диэлектрического шаров. Изобразите график зависимости напряжённости и потенциала от расстояния. Начало отсчёта поместите в центре шара.

1. Изготовьте *капельницу Кельвина*. Оцените её КПД.

Капельница Кельвина (названа в честь лорда Кельвина, предложившего идею её создания в 1867 г.) — это генератор электростатического напряжения, действие которого обусловлено преобразованием энергии гравитационного поля в электрическую энергию. С помощью этого устройства возможно получение электрического напряжения порядка нескольких киловольт.

Для изготовления устройства необходимо взять пять металлических банок. Две банки (*1*) нужно превратить в металлические трубы, удалив крышки и дно. У другой пары банок (*2*) удалить только крышки. Затем соединить банки так, как показано на рисунке, с помощью отрезков проволоки. Причём в месте перекрестия провод не должен иметь контакта.



Нижние банки необходимо поместить на изолированную поверхность (например, резиновые коврики).

Из оставшейся — пятой банки будет вытекать вода.

Устройство работает следующим образом: электропроводная недистиллированная вода капает из верхнего заземлённого сосуда. В силу случайных причин один из нижних сосудов *2* будет заряжен чуть больше, чем другой. В результате он зарядит сосуд *1*, соединённый с ним. Капли, проходящие через этот сосуд, будут взаимодействовать с ним. В итоге заряды нижних сосудов *2* будут постоянно увеличиваться, но иметь разные знаки.

Режим вытекания воды может быть разным. Она может капать, но может и литься струёй, но струя должна быть обязательно прерывистой. Разумеется, в процессе эксперимента придётся подбирать режим вытекания воды.

Будьте осторожны: банки в процессе эксперимента заряжаются. Соблюдайте технику безопасности!

2. Изготовьте *клетку Фарадея*.

Она была предложена в 1836 г. известным учёным М. Фарадеем для защиты от электрических полей.

Принцип работы клетки Фарадея заключается в том, что при помещении замкнутой электропроводящей оболочки в электрическое поле её свободные электроны приходят в движение под действием этого поля. Принцип действия устройства основан на

перераспределении электронов в проводнике под воздействием электромагнитного поля. В результате внутри клетки электрическое поле будет скомпенсировано.

Клетку можно изготовить из тонкой металлической сетки с мелкой ячейкой.

Для проверки защитных свойств полученного прибора поместите внутрь его имеющийся у вас алюминиевый цилиндр или электроскоп и убедитесь, что он не будет реагировать на поднесённое снаружи заряженное тело.

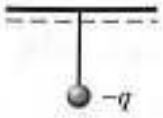
ЕГЭ **А1.** При трении пластмассовой линейки о шерсть шерсть заряжается положительно. Это объясняется тем, что

1) электроны переходят с линейки на шерсть
2) протоны переходят с линейки на шерсть
3) электроны переходят с шерсти на линейку
4) протоны переходят с шерсти на линейку

А2. Заряд электрона был установлен в опытах

1) Дж. Дж. Томсона
2) Р. Милликена
3) Э. Резерфорда
4) М. Фарадея

А3. К бесконечной горизонтальной отрицательно заряженной плоскости привязана невесомая нить с шариком, имеющим отрицательный заряд (см. рис.). Укажите условие равновесия шарика, если mg — модуль силы тяжести, $F_э$ — модуль силы кулоновского взаимодействия шарика с пластиной, T — модуль силы натяжения нити.



1) $-mg - T + F_э = 0$
2) $mg - T + F_э = 0$
3) $mg + T + F_э = 0$
4) $mg - T - F_э = 0$

А4. От капли, имевшей электрический заряд $+2e$, отделилась капля с зарядом $+e$. Модуль заряда оставшейся части капли

1) увеличился
2) уменьшился
3) не изменился
4) мог увеличиться и уменьшиться в зависимости от размера отделившейся капли

А5. Как изменится сила кулоновского взаимодействия двух точечных электрических зарядов, если расстояние между ними уменьшить в n раз?

1) увеличится в n раз
2) уменьшится в n раз
3) уменьшится в n^2 раз
4) увеличится в n^2 раз

А6. Силовая линия электрического поля — это

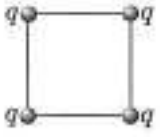
1) линия, вдоль которой в поле будет двигаться положительный заряд
2) линия, вдоль которой в поле будет двигаться отрицательный заряд
3) светящаяся линия в воздухе, которая видна при большой напряжённости поля
4) линия, в каждой точке которой напряжённость поля направлена по касательной

А7. Сила, действующая в поле на заряд в $4 \cdot 10^{5}$ Кл, равна 20 Н. Напряжённость поля в этой точке равна

1) $5 \cdot 10^{-5}$ Н/Кл
2) $8 \cdot 10^{-4}$ В/м
3) $0{,}2 \cdot 10^{-5}$ Н/Кл
4) $5 \cdot 10^{-6}$ Кл/Н

C8. Две непроводящие вертикально расположенные параллельные заряженные пластины находятся на расстоянии $d = 10$ см друг от друга. Напряжённость поля между ними $E = 10^5$ В/м. Между пластинами на равном расстоянии от них помещён шарик, имеющий заряд $q = 10^{-6}$ Кл и массу $m = 40$ г. После того как шарик отпустили, он начал падать. Через какое время Δt шарик ударится об одну из пластин?

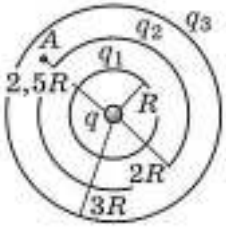
C9. Четыре одинаковых заряда q расположены на плоскости в вершинах квадрата и удерживаются в равновесии связывающими их, не проводящими ток нитями (см. рис.). Натяжение нитей $T = 7{,}6 \cdot 10^{-3}$ Н. Чему равна сила F, действующая на каждый из зарядов со стороны двух ближайших зарядов?



A10. В однородном электростатическом поле заряд перемещается по прямой ABC ($AB = BC$). Работа, совершённая полем на участке AB, равна 100 Дж. Работа на участке BC

1) равна 0
2) равна 100 Дж
3) равна 200 Дж
4) зависит от взаимного расположения прямой AB и линий напряжённости поля

C11. Три концентрические сферы радиусами $R_1 = R$, $R_2 = 2R$ и $R_3 = 3R$ имеют равномерно распределённые по их поверхностям заряды $q_1 = +2q$, $q_2 = +q$ и $q_3 = +q$ соответственно (см. рис.). Чему равен потенциал поля в точке A, отстоящей от центра сфер на расстоянии $R_4 = 2{,}5R$, если известно, что точечный заряд q создаёт на расстоянии R электрическое поле с потенциалом $\varphi_1 = 100$ В?



C12. Конденсатор, электрическая ёмкость которого $C_1 = 5$ мкФ, заряжен так, что разность потенциалов между его пластинами $U_1 = 100$ В. Другой конденсатор, электрическая ёмкость которого $C_2 = 10$ мкФ, имеет разность потенциалов между пластинами $U_2 = 50$ В. Одноимённо заряженные пластины конденсаторов попарно соединили проводниками. Чему равен модуль разности потенциалов U между пластинами каждого конденсатора?

C13. Проводящий шар радиусом 10 см с зарядом 6 нКл окружён сферической оболочкой из диэлектрика радиусом 20 см (см. рис.). Диэлектрическая проницаемость вещества оболочки равна 3. Определите напряжённость поля вблизи внутренней (*1*) и внешней (*2*) поверхностей диэлектрика.



C14. Конденсаторы, электрическая ёмкость которых $C_1 = 4$ мкФ и $C_2 = 8$ мкФ, заряжают до напряжения 3 В каждый, а затем «плюс» одного из них подключают к «минусу» другого и соединяют свободные выводы резистором сопротивлением 1000 Ом. Какое количество теплоты выделится в резисторе?

Глава 5. Постоянный электрический ток

§ 54. Условия существования постоянного тока

Повторите: электрический заряд, электрическое поле.

В предыдущей главе рассматривались электрические явления, в которых электрические заряды находились в покое. Но наибольший практический интерес представляют явления, связанные с упорядоченным движением электрических зарядов.

ЗАПОМНИТЕ Упорядоченное движение электрически заряженных частиц называется **электрическим током.**

Основной характеристикой электрического тока является сила тока I. **Сила тока** I равна заряду, переносимому через поперечное сечение проводника за единицу времени: $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$.

Электрический ток называется **постоянным**, если сила тока и его направление не изменяются с течением времени.

За направление тока условно выбрано направление движения положительных зарядов.

Постоянный электрический ток может возникать в результате процессов различной физической природы. Например, испускаемые радиоактивными веществами отрицательно заряженные электроны и положительно заряженные α-частицы могут в вакууме пролетать беспрепятственно значительные расстояния. Такой поток электронов или α-частиц представляет собой постоянный электрический ток.

В данной главе нас будет интересовать постоянный ток в проводниках, создаваемый благодаря особым устройствам — *источникам тока.*

Напомним, что проводники — это такие тела, в которых имеются свободные частицы, обладающие электрическим зарядом и способные ускоряться и, следовательно, перемещаться под действием приложенных к ним электрических сил. Если бы заряженные частицы, приведённые в движение в замкнутом проводнике, не взаимодействовали с другими частицами, то они двигались бы бесконечно долго.

Такой ток можно наблюдать в некоторых веществах при весьма низких температурах; удельное сопротивление таких веществ — их называют сверхпроводниками — равно нулю при этих температурах.

Но в большинстве проводников при прохождении тока движущиеся заряженные частицы взаимодействуют с неподвижными частицами и теряют свою кинетическую энергию.

Поэтому для поддержания постоянного тока в цепи необходимо пополнять энергию заряженных частиц, т. е. совершать работу за счёт действия каких-то источников.

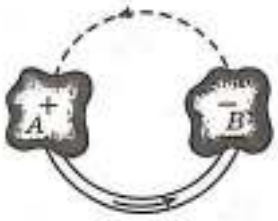


Рис. 5.1

Возьмём два заряженных проводящих тела, заряды которых равны по модулю, но противоположны по знаку. Соединим эти тела проводником (рис. 5.1). По проводнику пойдёт ток.

Перемещение зарядов будет происходить до тех пор, пока не исчезнет электрическое поле в проводнике в результате выравнивания потенциалов на телах A и B. После этого ток в проводнике прекратится.

Для того чтобы ток был постоянным, необходимо, чтобы на концах проводника поддерживалась постоянная разность потенциалов, иными словами, чтобы в проводнике существовало неизменяющееся электрическое поле.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Очевидно, заряженные тела не годятся для создания постоянного тока в цепи. Для этой цели необходимо особое устройство — *источник тока* (генератор).

Что такое источник тока? Для того чтобы ток не прекращался, необходимо, чтобы положительные заряды, перемещающиеся на тело B с тела A, вновь возвращались на тело A, а отрицательные заряды возвращались на тело B, т. е. чтобы на некотором участке замкнутой цепи заряды двигались против действующих на них электростатических сил, как это показано пунктиром на рисунке 5.1. Для этого на заряды, кроме электростатических сил, должны действовать другие силы, направленные противоположно электростатическим силам.

ЗАПОМНИТЕ Силы неэлектростатического происхождения, направленные противоположно электростатическим силам, называют **сторонними силами.**

Источник тока представляет собой устройство, в котором на электрические заряды действуют сторонние силы.

Сторонние силы в различных источниках возникают по разным причинам. В химических источниках, например в автомобильном аккумуляторе или в гальваническом элементе, они возникают в результате химических реакций на границе соприкосновения пластин аккумулятора или электродов батарейки с жидким электролитом. В фотоэлементе они возникают в результате действия света на электроны в металле или полупроводнике. В генераторах электростанций сторонние силы возникают при движении проводников в магнитном поле.

Электрическая цепь постоянного тока. Рассмотрим простейшую электрическую цепь постоянного тока, составленную из гальванического элемента, электрической лампы и проводников.



Г. Ом

При замыкании электрической цепи нить лампы нагревается проходящим через неё электрическим током и излучает свет. Постоянная интенсивность свечения лампы свидетельствует о том, что в цепи идёт постоянный, не изменяющийся во времени электрический ток. Подключив к выводам гальванического элемента прибор для измерения разности потенциалов — вольтметр, мы обнаружим, что на выходе источника тока она также остаётся неизменной.

На внешнем участке цепи электрические заряды движутся под действием сил электрического поля. Перемещение зарядов внутри проводника не приводит к выравниванию потенциалов всех точек проводника, так как в каждый момент времени за счёт действия источника тока к одному концу электрической цепи подходит точно такое же количество электричества, какое из него перешло к другому концу внешней электрической цепи. Поэтому сохраняется неизменной разность потенциалов между началом и концом внешнего участка электрической цепи, что, в свою очередь, приводит к тому, что напряжённость электрического поля внутри проводников в этой цепи остаётся постоянной во времени.

Зависимость силы тока от напряжения. Немецкий физик Георг Ом в 1826 г. обнаружил, что сила тока I в проводнике прямо пропорциональна напряжению (разности потенциалов) на его концах:

$$I \sim U.$$

Другими словами, отношение напряжения на концах проводника к силе тока в нём есть величина постоянная:

$$\frac{U}{I} = R = \text{const}.$$

ЗАПОМНИТЕ Величина R, равная отношению напряжения на концах проводника к силе тока в нём, называется **электрическим сопротивлением проводника.**

Таким образом, закон Ома для участка цепи можно сформулировать следующим образом:

ЗАКОН ОМА сила тока в цепи прямо пропорциональна напряжению (разности потенциалов) на его участке и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка:

$$I = \frac{U}{R}.$$

Единицей электрического сопротивления в СИ является ом:

$$1\ \text{Ом} = \frac{1\ \text{В}}{1\ \text{А}}.$$

Электрическое сопротивление проводника зависит от вещества, длины l и площади поперечного сечения S:

$$R = \rho\frac{l}{S}. \qquad (54.1)$$

ЗАПОМНИТЕ Коэффициент ρ в формуле (54.1) называется **удельным сопротивлением вещества**.

Электродвижущая сила источника. В источниках тока сторонние силы перемещают положительные заряды между электродами от отрицательного полюса к положительному, а отрицательные заряды от положительного к отрицательному полюсу. Чем больший заряд перемещается при этом, тем большая работа $A_{ст}$ совершается.

Отношение работы $A_{ст}$ к переносимому заряду для данного источника остаётся постоянной величиной. Поэтому указанное отношение может служить характеристикой источника тока.

ЗАПОМНИТЕ Отношение работы сторонних сил к значению положительного заряда, переносимого внутри источника от отрицательного полюса к положительному, называют **электродвижущей силой источника** (сокращённо: **ЭДС**).

Обозначают её русской рукописной буквой $\mathscr{E}$. Из определения ЭДС следует:

$$\mathscr{E} = A_{ст}/q,$$

где $A_{ст}$ — работа, совершаемая в источнике сторонними силами при перемещении положительного заряда q. Из этой формулы видно, что ЭДС, как и разность потенциалов, выражается в вольтах.

Различные источники тока различаются значением ЭДС. Например, ЭДС гальванических элементов равна 1—2 В, свинцовых аккумуляторов — 2 В; ЭДС индукционных генераторов достигает 15 кВ.



Рис. 5.2

Когда к полюсам источника тока присоединяют проводник, то на внешнем участке цепи электрические заряды движутся под действием электростатических сил $\vec{F}_э$, внутри же источника на них действуют сторонние силы $\vec{F}_{ст}$ и электростатические силы $\vec{F}_э$ (рис. 5.2).

Работа $A_ц$ перемещения заряда по всей замкнутой цепи складывается из работы электростатических сил $A_{1,2}$ на внешнем участке цепи, работы электростатических сил $A_{2,1}$ на внутреннем участке и работы сторонних сил $A_{ст}$:

$$A_ц = A_{1,2} + A_{2,1} + A_{ст}.$$

Первые два слагаемых представляют собой работу электростатических сил по замкнутому участку. Она, как известно, равна нулю. Следовательно,

$$A_ц = A_{ст}. \qquad (54.2)$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Таким образом, работа по перемещению заряда во всей замкнутой цепи совершается за счёт сторонних сил. Работа сторонних сил компенсирует потери энергии носителями заряда при их движении по всей цепи.

Рассчитаем работу по переносу единичного положительного заряда.

Из равенства (54.2) получим

$$A_ц/q = A_{ст}/q = \mathscr{E}.$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Итак, ЭДС источника равна отношению работы, совершаемой сторонними силами при перемещении положительного заряда по всей замкнутой цепи, к значению этого заряда.



Рис. 5.3

Механическая аналогия электрической цепи. Для того чтобы яснее представить себе, для чего нужен источник тока, рассмотрим принцип действия устройства, изображённого на рисунке 5.3. Здесь шарик, движущийся вдоль винтовой наклонной плоскости, служит моделью свободной заряженной частицы («носителя заряда»), консервативное потенциальное поле силы тяжести служит аналогом консервативного электрического поля, сила трения служит аналогом электрического сопротивления. Соответственно движение свободных электрических зарядов в проводнике под действием электрического поля аналогично движению шариков под действием силы тяжести.

Если бы на шарики при их движении не действовала сила трения, то их кинетическая энергия у основания плоскости была бы равна потенциальной энергии у её вершины. За счёт этой кинетической энергии шарики могли бы подняться к вершине *A* по участку *CA* и вновь двигаться вниз. Следовательно, при отсутствии трения движение шариков было бы непрерывным.

Однако, двигаясь по наклонной плоскости, шарики из-за трения теряют энергию. Поэтому для их непрерывного движения нужно, чтобы на участке *CA* на них действовала какая-то сила, направленная противоположно силе тяжести, и совершала работу, поднимая их вновь к вершине *A*. Эту работу может совершить, например, рука, поднимающая шарики. Сила мышц руки и будет аналогом сторонних сил в электрической цепи.

Электрический ток. Электрическая цепь. Электродвижущая сила источника. Условия существования электрического тока

1. Что такое постоянный электрический ток? 2. При каких условиях в замкнутой электрической цепи идёт постоянный электрический ток? 3. Каково назначение источника тока? 4. Что такое сторонние силы? 5. Что такое ЭДС?

Из толстого медного провода сделайте два электрода, включите их в цепь, содержащую батарейку, лампочку, соединительные провода. Опустите эти электроды в дистиллированную воду. Убедитесь, что лампочка не горит. Затем насыпьте в воду немного сахара. Будет ли гореть лампочка? И наконец, добавьте немного соли. А теперь — загорелась ли лампочка? Объясните результаты эксперимента.

Условия возникновения тока в веществе.

§ 55. Работа и мощность тока

Повторите: работа и мощность.

Работа и мощность электрического тока. Если через проводник с электрическим сопротивлением R в течение времени t проходит постоянный электрический ток, сила тока которого равна I, то работа сил электрического поля (или работа электрического тока) за это время равна:

$$A = qU = IUt = I^2Rt = \frac{U^2t}{R}.$$

Мощность P тока равна работе электрического тока, совершаемой за единицу времени:

$$P = \frac{A}{t}.$$

Мощность P электрического тока равна:

$$P = IU = I^2R = \frac{U^2}{R}.$$

Единицей работы электрического тока в СИ является джоуль, единицей мощности — ватт:

$$1\ \text{Дж} = 1\ \text{Кл} \cdot 1\ \text{В}, \quad 1\ \text{Вт} = \frac{1\ \text{Дж}}{1\ \text{с}} = 1\ \text{А} \cdot 1\ \text{В}.$$

Тепловое действие электрического тока. Если электрический ток идёт в цепи, где не происходят химические реакции и не совершается механическая работа, то энергия электрического поля превращается во внутреннюю энергию проводника и его температура возрастает. Путём теплообмена эта энергия в форме тепла передаётся окружающим более холодным телам.

ЗАКОН ДЖОУЛЯ–ЛЕНЦА Количество теплоты, выделяющейся в проводнике при прохождении тока, равно работе электрического тока:

$$Q = A = I^2Rt = \frac{U^2t}{R}.$$



Дж. Джоуль

Этот закон независимо друг от друга установили опытным путём английский физик Дж. Джоуль (1818—1889) и русский физик Э. Х. Ленц (1804—1865). *Закон Джоуля — Ленца* следует из закона сохранения энергии.

Тепловое действие электрического тока находит широкое применение в быту и технике — лампы накаливания, электрические плиты, кипятильники, печи для плавления металлов и т. д.



Э. Х. Ленц

ИНТЕРЕСНО **Почему необходимо высокое напряжение при передаче электрической энергии на большие расстояния?** Электрический ток можно передавать по проводам на большие расстояния — от электростанций к потребителям. При этом неизбежны потери энергии на нагревание проводов. В линиях электропередачи (ЛЭП) большой протяжённости эти потери могут быть очень велики, если не принять специальных мер для их уменьшения. Выясним, от чего зависят эти потери и как можно их уменьшить.

Допустим, что P — это мощность, которая передаётся от электростанции к потребителю, а P_1 — мощность, которая теряется в проводах.

Мощность P_1 равна $P_1 = I^2R$, где R — сопротивление проводов; I — сила тока в линии. Силу тока в линии можно определить по передаваемой мощности: $I = \frac{P}{U}$, где U — напряжение на полюсах источника, т. е. напряжение между проводами в начале линии электропередачи.

Подставив значение силы тока в формулу $P_1 = I^2R$ и заменив сопротивление проводов двухпроводной ЛЭП по формуле $R = 2l\rho/S$, получим

$$P_1 = \frac{P^2R}{U^2} = \frac{2\rho lP^2}{SU^2}. \qquad (55.1)$$

Формула (55.1) показывает, что мощность, которая теряется в проводах, зависит от напряжения U и площади поперечного сечения проводов S. Расстояние l от генератора до потребителя и мощность P данной ЛЭП являются заданными величинами. Для проводов используется медь или алюминий.

Возможности снижения потерь за счёт увеличения площади поперечного сечения ограничены из-за повышения стоимости линии и массы проводов. Поэтому потери уменьшают за счёт повышения напряжения. В мощных линиях электропередачи допустимыми считаются потери не более 8 %, т. е. $\alpha = P_1/P = 0{,}08$.

Работа и мощность электрического тока. Тепловое действие электрического тока

Почему с повышением напряжения уменьшаются потери в линии электропередачи?

РЕШИТЕ 55.1. Резистор с электрическим сопротивлением 2 МОм рассчитан на рассеяние мощности 2 Вт. Вычислите максимально допустимые значения силы тока и напряжения для этого резистора.

55.2. При ремонте электроплитки её спираль укоротили на 30 %. Во сколько раз изменилась при этом мощность плитки?

55.3 Чему должна быть равна площадь поперечного сечения алюминиевых проводов для передачи энергии на 1000 км, если передаваемая мощность составляет 1 ГВт, напряжение в линии электропередачи равно 500 кВ, а часть мощности, теряемой в проводах, $\alpha = 0{,}08$? Для алюминия $\rho = 2{,}8 \cdot 10^{-8}$ Ом · м. Чему должна быть равна площадь поперечного сечения проводов той же линии при напряжении 250 В?

Передача электрической энергии на большие расстояния.

§ 56. Закон Ома для полной цепи

Повторите: электрическая цепь.

Закон Ома для полной цепи. На рисунке 5.4 изображена замкнутая цепь постоянного тока. ЭДС источника равна $\mathscr{E}$, его внутреннее сопротивление r, сопротивление внешнего участка цепи (нагрузки) R, сопротивлением проводов пренебрегаем. Ток идёт в направлении, указанном стрелкой.

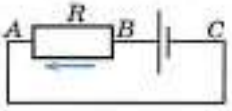


Рис. 5.4

Полная работа $A_{полн}$ при перемещении заряда q по замкнутой цепи равна сумме работы $A_{ст}$ сторонних сил и работы $A_{эл}$ кулоновских сил:

$$A_{полн} = A_{ст} + A_{эл}.$$

При перемещении заряда по замкнутому контуру работа кулоновских сил равна нулю: $A_{эл} = 0$, следовательно, $A_{полн} = A_{ст}$.

Полная работа $A_{полн}$ равна сумме работы тока на внутреннем и работы тока на внешнем участках цепи:

$$A_{полн} = I^2rt + I^2Rt,$$

где r и R — электрические сопротивления внутреннего и внешнего участков цепи.

Работа сторонних сил равна:

$$A_{ст} = q\mathscr{E} = It\mathscr{E}.$$

Отсюда следует:

$$I^2rt + I^2Rt = It\mathscr{E},$$

$$\mathscr{E} = I(r + R),$$

$$\boxed{I = \frac{\mathscr{E}}{r + R}.} \qquad (56.1)$$

Полученное выражение называется *законом Ома для полной цепи.*

ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ Сила тока в полной цепи равна электродвижущей силе источника, делённой на сумму сопротивлений внешнего и внутреннего участков цепи.

Из формулы закона Ома следует, что сила тока в цепи зависит от трёх величин. Две из них — ЭДС $\mathscr{E}$ и внутреннее сопротивление источника r — относятся к самому источнику, а третья — R — к внешней цепи.

Формула закона Ома для всей цепи показывает, как можно приближённо измерить ЭДС источника. Если замкнуть источник на вольтметр, сопротивление которого $R_в$ значительно больше внутреннего сопротивления источника r ($R_в \gg r$), то внутренним сопротивлением можно пренебречь, и тогда из формулы (56.1) следует:

$$\mathscr{E} = IR_в.$$

Значит, измеряя напряжение на полюсах источника, замкнутого внешней нагрузкой, сопротивление которой $R \gg r$, мы получаем приближённое значе-

ние ЭДС источника. Чем больше сопротивление внешней нагрузки по сравнению с внутренним сопротивлением источника, тем более точный результат будет получен.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Очевидно, что ЭДС источника тока равна напряжению между полюсами разомкнутого источника тока (когда сопротивление внешней цепи бесконечно велико).

Принципиально правильно напряжение между полюсами разомкнутого источника можно измерить с помощью электрометра или электростатического вольтметра.

Короткое замыкание. Какие же предельные значения силы тока можно получить в цепи, пользуясь данным источником тока? ЭДС источника $\mathscr{E}$ и его внутреннее сопротивление r являются величинами постоянными. Поэтому сила тока в цепи будет зависеть только от сопротивления внешней цепи R.

Пусть к полюсам источника присоединён проводник, сопротивление которого ничтожно мало по сравнению с внутренним сопротивлением источника. Этот случай в технике получил название *короткого замыкания*.

Из закона Ома следует, что если сопротивление $R = 0$, то напряжение между полюсами источника ($U = IR$) уменьшается до нуля, а сила тока короткого замыкания достигает максимального значения: $I_{к.з} = \mathscr{E}/r$.

Как мы видим, сила тока короткого замыкания зависит не только от ЭДС источника, но и от внутреннего сопротивления. У источника со сравнительно большим внутренним сопротивлением, как, например, у гальванических элементов, сила тока короткого замыкания небольшая, а потому этот ток для них не очень опасен.

В свинцовых же аккумуляторах внутреннее сопротивление мало (0,1—0,01 Ом), поэтому сила тока короткого замыкания очень велика, порядка 20—200 А. Такой ток может разрушить пластины аккумуляторов. Особенно опасны короткие замыкания в осветительных сетях, питаемых от подстанций. При значительной ЭДС (свыше 100 В) внутреннее сопротивление этих источников ничтожно мало. Поэтому сила тока короткого замыкания может достигнуть тысяч ампер. В этом случае короткое замыкание может вызвать перегрев проводов, пожар в здании и т. д. Чтобы избежать этого, в такие цепи включают предохранители, в которых тонкий проводник AB (рис. 5.5) плавится при силе тока, превышающей её допустимое значение для данной цепи, и размыкает цепь. В настоящее время обычно применяют электромагнитный автоматический выключатель.

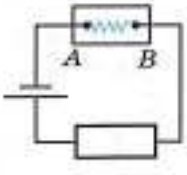


Рис. 5.5

Закон Ома для полной цепи. Короткое замыкание

1. Как формулируется закон Ома для полной цепи? 2. Почему напряжение на полюсах источника тока зависит от электрического сопротивления внешней цепи? 3. При каком условии напряжение, измеренное на полюсах источника тока, можно считать равным ЭДС источника?

ЗАДАЧА 1. Проводник длиной 50 см и площадью поперечного сечения 0,2 мм^2 изготовлен из материала с удельным сопротивлением $1{,}2 \cdot 10^{-6}$ Ом · м и подключён к источнику тока, ЭДС которого 4,5 В и внутреннее сопротивление 3 Ом. Определите напряжение между концами проводника и напряжённость электрического поля в нём.

Решение. $U = IR; \quad I = \frac{\mathscr{E}}{R+r}; \quad R = \rho\frac{l}{S};$

$$U = \frac{\mathscr{E}R}{R+r} = \frac{\mathscr{E}}{1+\frac{r}{R}} = \frac{\mathscr{E}}{1+\frac{rS}{\rho l}} = \frac{4{,}5}{1+\frac{3\cdot 0{,}2\cdot 10^{-6}}{1{,}2\cdot 10^{-6}\cdot 0{,}5}}\ (\text{В}) = 2{,}25\ \text{В};$$

$$E = \frac{U}{l} = \frac{2{,}25\ \text{В}}{0{,}5\ \text{м}} = 4{,}5\ \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

ЗАДАЧА 2. Какую ошибку в измерении ЭДС источника тока мы допускаем, если показание школьного лабораторного вольтметра, присоединённого к его полюсам, равное 4 В, принимаем за ЭДС источника тока? Внутреннее сопротивление источника тока $r = 5$ Ом, сопротивление вольтметра $R_в = 2000$ Ом.

Решение. Вольтметр показывает напряжение между его зажимами. Когда вольтметр присоединён к полюсам источника, показания вольтметра меньше ЭДС источника.

Напряжение на зажимах $U = IR_в$, электродвижущая сила $\mathscr{E} = I(R_в + r)$. Отсюда $\mathscr{E} = \frac{U(R_в+r)}{R_в} = \frac{4\cdot 2005}{2000}\ (\text{В}) = 4{,}01\ \text{В}$.

Таким образом, абсолютная ошибка в измерении ЭДС составляет: $\Delta\mathscr{E} = \mathscr{E} - U = Ir$, т. е. $\Delta\mathscr{E} = 0{,}01$ В, а относительная ошибка

$$\delta = \frac{\Delta\mathscr{E}}{\mathscr{E}} = \frac{Ir}{I(R_в+r)} = \frac{r}{R_в+r} \approx \frac{r}{R_в} = \frac{0{,}01}{4} = 0{,}0025, \text{ или } 0{,}25\ \%.$$

Если цена деления вольтметра равна 0,2 В, то ошибка в 0,01 В не может быть обнаружена при измерении данным вольтметром.

РЕШИТЕ

56.1. ЭДС источника тока равна 4 В, к его полюсам присоединён резистор с номинальным сопротивлением 8 Ом, в результате чего в цепи установилась сила тока 0,4 А. Определите по этим данным внутреннее сопротивление источника.

56.2. Определите показания вольтметра и амперметра в цепи по схеме (рис. 5.6). ЭДС источника равна 9 В, его внутреннее сопротивление равно 0,2 Ом, сопротивления резисторов $R1$ и $R2$ соответственно равны 1,8 и 10 Ом. Сопротивление вольтметра считайте бесконечно большим, амперметра — бесконечно малым.

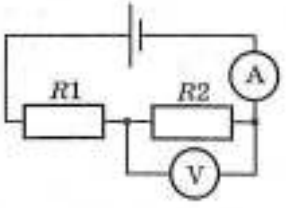


Рис. 5.6

56.3. К полюсам источника тока с ЭДС 8 В присоединили проводник сопротивлением 30 Ом. При этом напряжение между концами проводника стало 6 В. Чему равно внутреннее сопротивление источника?

56.4. Для определения ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока к его выходу подключили реостат. При одном положении движка реостата сила тока в цепи была $I_1 = 1{,}5$ А,

а напряжение $U_1 = 4{,}5$ В; при другом положении движка получены значения $I_2 = 2$ А, $U_2 = 3$ В. Определите ЭДС источника и его внутреннее сопротивление.

56.5. Опасным для жизни человека является поражение электрическим током при силе тока более 20 мА. Какое напряжение может представлять опасность для жизни человека? Электрическое сопротивление тела человека при повреждённой коже около 1000 Ом.

56.6. Электрическое сопротивление верхнего рогового слоя кожи человека примерно 100 кОм, электрическое сопротивление тела человека при повреждённой коже около 1 кОм. Электрический пробой кожи человека наступает при напряжении около 200 В. Какие значения имеет сила тока при этом напряжении при неповреждённой коже и после электрического пробоя кожи?

56.7. В школьном кабинете используется высоковольтный выпрямитель с ЭДС до 100 кВ. Чему равно минимальное значение сопротивления резистора, который должен быть включён внутри прибора для ограничения силы тока в целях безопасности, если опасной для жизни человека является сила тока 20 мА?

56.8. В цепи, изображённой на рисунке 5.7, ползунок реостата переместили так, что лампочка стала светить ярче. Как изменилось при этом показание вольтметра?

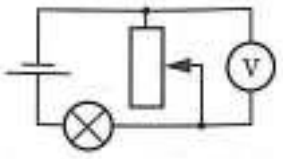


Рис. 5.7

56.9. Электрическая цепь состоит из источника тока и резистора. Во сколько раз уменьшится сила тока в ней, если резистор с сопротивлением R заменить резистором с вдвое большим сопротивлением? Внутреннее сопротивление источника тока равно r.

56.10. ЭДС батареи аккумуляторов равна 12 В, а её внутреннее сопротивление равно 0,04 Ом. Чему равна сила тока короткого замыкания у этого аккумулятора?

56.11. Какой должна быть площадь поперечного сечения алюминиевых проводов, по которым от генератора с ЭДС 70 В подаётся ток к сварочному аппарату? Для нормальной работы сварочного аппарата на нём должно поддерживаться напряжение 50 В. Потребляемая аппаратом мощность 1 кВт, расстояние от него до генератора 20 м, внутреннее сопротивление генератора 0,05 Ом, удельное сопротивление алюминия $2{,}8 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.

56.12. Постройте график зависимости мощности, выделяемой на внешнем участке цепи, от сопротивления этого участка, если ЭДС источника 4,5 В, а его внутреннее сопротивление 2 Ом.

56.13. Докажите, что мощность, выделяемая на внешнем участке цепи, максимальна при равенстве электрического сопротивления внешнего участка цепи внутреннему сопротивлению источника.

56.14. К источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 10$ В и внутренним сопротивлением $r = 1$ Ом подключена система из четырёх резисторов сопротивлением $R = 1$ Ом каждый. Как нужно соединить эти резисторы, чтобы в них выделилась максимальная мощность?

Характеристики резисторов, их маркировка.

1. Скачайте в Интернете программу «Начала электроники» (свободно распространяемый продукт). Ознакомьтесь с рабочим полем программы и его элементами. Соберите с помощью программы схему, показанную на рисунке 5.6. Полученный результат сравните с результатами задачи 56.2.

2. С помощью программы «Начала электроники» выполните лабораторную работу «Принципы работы плавких предохранителей в электрических цепях».

§ 57. Последовательное и параллельное соединение проводников в электрической цепи

Повторите: последовательное и параллельное соединение проводников.

Электрическая цепь состоит из различных элементов, которые могут быть соединены последовательно или параллельно.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

При *последовательном соединении проводников* (рис. 5.8) сила тока во всех проводниках одинакова:

$$I = I_1 = I_2.$$

В противном случае заряды накапливались бы в каких-то точках цепи.

Напряжение U на всей цепи равно:

$$U = U_1 + U_2. \qquad (57.1)$$

Применяя закон Ома для участка цепи ко всей внешней цепи, сопротивление которой R, и к каждому из последовательно соединённых проводников R_1 и R_2, получаем

$$U = IR, \quad U_1 = IR_1, \quad U_2 = IR_2.$$

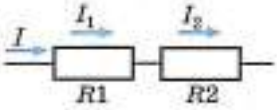


Рис. 5.8

Отсюда с учётом соотношения (57.1) следует: $IR = IR_1 + IR_2$, или

$$R = R_1 + R_2.$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

При последовательном соединении полное сопротивление цепи равно сумме сопротивлений всех отдельных проводников:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots + R_n.$$

При *параллельном соединении проводников* (рис. 5.9) напряжения U_1 и U_2 одинаковы, так как резисторы присоединены к одним и тем же точкам цепи (A и B).

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Напряжение на всей цепи при параллельном соединении проводников

$$U_1 = U_2 = U.$$

Сила тока в неразветвлённой цепи равна сумме сил токов в параллельно соединённых проводниках:

$$I = I_1 + I_2. \qquad (57.2)$$

Обозначим полное сопротивление разветвлённой цепи через R, а сопротивления проводников на этом участке через R_1 и R_2.

Из закона Ома для участка цепи следует:

$$I = \frac{U}{R}, \quad I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2}. \qquad (57.3)$$

Отсюда с учётом соотношения (57.2) получаем

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

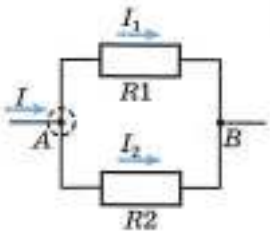


Рис. 5.9

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Величина, обратная сопротивлению всего разветвлённого участка цепи, равна сумме величин, обратных сопротивлениям параллельно соединённых проводников.



Рис. 5.10

В электрической цепи могут быть участки со смешанным соединением — как с последовательным, так и с параллельным (рис. 5.10). В этой цепи участок AB представляет собой параллельное соединение, а вся цепь — последовательное соединение участков AB и BC.

Шунт к амперметру. Каждый измерительный прибор рассчитывают на определённую максимальную для него силу тока или на предельное для него напряжение. Но всегда оказывается возможным расширить пределы измерения данным прибором. Рассмотрим, как можно увеличить пределы измерения силы тока данным амперметром.

Для этого параллельно амперметру присоединяют проводник, через который проходит часть измеряемого тока. Сопротивление этого проводника, называемого шунтом, рассчитывают так, чтобы сила тока через амперметр не превышала его предельного значения, а остальная часть тока шла через шунт. При этом, разумеется, изменится цена деления шкалы данного прибора.

Поясним это на примере. Амперметром, сопротивление которого равно $R_а$, рассчитанным на максимальную силу тока $I_а$, требуется измерить силу тока в цепи $I_ц$, которая может достигать значений, в n раз превышающих максимально допустимую силу тока в амперметре ($I_ц = nI_а$). Чему должно быть равно сопротивление $R_ш$ шунта Ш (рис. 5.11)?

Сопротивление шунта можно найти, если известны напряжение на шунте и сила тока в нём. Применяя формулы для параллельного соединения проводников (57.2) и (57.3), получаем $I_ш = I_ц - I_а = (n-1)I_а$ и $\frac{I_ш}{I_а} = \frac{R_а}{R_ш}$.

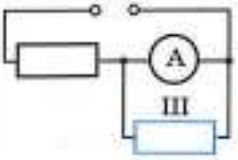


Рис. 5.11

Решая эти уравнения, находим сопротивление шунта: $R_ш = R_а \frac{I_а}{I_ц - I_а} = \frac{R_а}{n-1}$.

Отсюда следует, что если амперметром, рассчитанным на силу тока, например, до 1 А, нужно измерить токи, в 10 раз большие ($n = 10$), то сопротивление шунта должно быть меньше сопротивления амперметра в 9 раз. При этом цена каждого деления увеличивается в 10 раз.

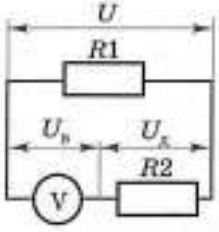


Рис. 5.12

Дополнительное сопротивление к вольтметру. Чтобы увеличить пределы измерения напряжения вольтметром, последовательно ему подключают дополнительный резистор.

Определим, например, каким должно быть сопротивление резистора $R2$ (рис. 5.12), чтобы вольтметром, рассчитанным на максимальное напряжение $U_в$, можно было измерять напряжение U на резисторе $R1$, в n раз большее ($U = nU_в$).

Так как резистор $R2$ соединён последовательно с вольтметром, то сумма напряжений на нём и вольтметре равна измеряемому напряжению: $U_в + U_д = U$, где $U_д$ — напряжение на резисторе $R2$.

Напряжения же на вольтметре и резисторе $R2$ пропорциональны их сопротивлениям: $\frac{U_в}{U_д} = \frac{R_в}{R_д}$. Отсюда $R_д = \frac{U_д}{U_в} R_в$. Подставив в это выражение значение $U_д$, получим

$$R_д = \frac{U - U_в}{U_в} R_в = (n-1)R_в.$$

Обычно в технических приборах шунты к амперметрам и дополнительные сопротивления к вольтметрам находятся внутри самих приборов.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Для изменения силы тока в электрической цепи используется прибор, называемый *реостатом*. Реостат включается в электрическую цепь последовательно, регулирование силы тока в цепи осуществляется путём изменения электрического сопротивления реостата при перемещении скользящего контакта K по его проволочной обмотке (рис. 5.13).

Для регулирования напряжения, подаваемого на элемент R электрической цепи, используется прибор, называемый *потенциометром*. Потенциометр представляет собой резистор со скользящим контактом. Концы A и B потенциометра присоединяют к полюсам источника тока, а элемент — к одному из концов потенциометра и выводу от скользящего контакта (рис. 5.14).

При таком включении элемента к нему будет подводиться часть напряжения, которое создаётся источником тока на концах потенциометра. Потенциометр применяется в ряде радиоэлектронных устройств для регулировки громкости звучания радиоприёмников и магнитофонов, яркости свечения телевизионной трубки.

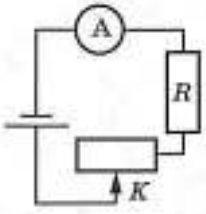


Рис. 5.13

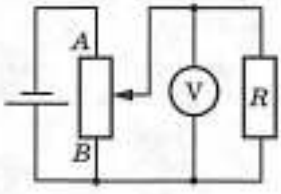


Рис. 5.14

Расширение пределов измерения приборов. Шунт. Дополнительное сопротивление

1. Докажите, что при последовательном соединении проводников их общее электрическое сопротивление равно сумме электрических сопротивлений всех проводников. 2. Докажите, что при параллельном включении проводников обратная величина общего сопротивления цепи равна сумме обратных величин сопротивлений всех параллельно включённых проводников.

ЗАДАЧА 1. К источнику тока с ЭДС $\mathscr{E} = 6$ В и внутренним сопротивлением $r = 0{,}5$ Ом присоединены два резистора с сопротивлениями $R_1 = 2$ Ом

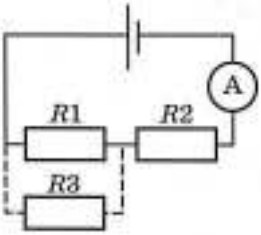


Рис. 5.15

и R_2 = 1,5 Ом, соединённые последовательно, и амперметр (рис. 5.15). Сопротивление амперметра не учитывайте.

а) Определите силу тока, которую показывает амперметр.

б) Чему будут равны показания амперметра, если параллельно первому резистору будет присоединён ещё один с сопротивлением R_3 = 2 Ом?

Решение. а) Внешняя цепь состоит из двух последовательно соединённых проводников, сопротивления которых R_1 и R_2:

$$R_{1,2} = R_1 + R_2.$$

По закону Ома для полной цепи сила тока равна $I = \frac{\mathscr{E}}{R+r}$, откуда

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R_1 + R_2 + r} = \frac{6}{2 + 1{,}5 + 0{,}5}\ (\text{А}) = 1{,}5\ \text{А}.$$

б) Если сопротивление параллельно соединённых проводников обозначить через $R_{1,3}$, то всё внешнее сопротивление $R = R_{1,3} + R_2$.

Сопротивление $R_{1,3}$ находим из формулы $\frac{1}{R_{1,3}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}$, откуда $R_{1,3} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}$.

Следовательно, $R = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + R_2$. Тогда

$$I = \frac{\mathscr{E}}{\frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + R_2 + r}\ (\text{А}) = 2\ \text{А}.$$

ЗАДАЧА 2. Резистор $R1$ сопротивлением R_1 = 150 Ом включают в сеть с напряжением 220 В при помощи потенциометра. Сопротивление потенциометра R_2 = 600 Ом. Чему будет равно напряжение между концами резистора, если ползунок расположить посередине обмотки потенциометра (рис. 5.16)?

Решение. Когда ползунок находится посередине, проводник оказывается включённым параллельно половине обмотки потенциометра, сопротивление которой $R_3 = \frac{R_2}{2}$.

Общее сопротивление R этих параллельно соединённых проводников найдём из формулы

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_1} + \frac{2}{R_2} = \frac{R_2 + 2R_1}{R_1 R_2}; \qquad R = \frac{R_1 R_2}{2R_1 + R_2} = \frac{150 \cdot 600}{300 + 600}\ (\text{Ом}) = 100\ \text{Ом}.$$

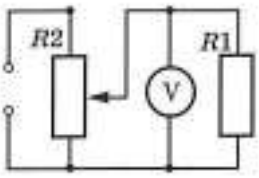


Рис. 5.16

В сеть оказываются включёнными последовательно два участка с сопротивлениями $R_2/2$ и R. Напряжения на этих участках распределяются пропорционально их сопротивлениям:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_2}{2R} = \frac{600}{200} = 3, \qquad U_1 = 3U_2,$$

а сумма напряжений равна напряжению между концами цепи:

$$U_1 + U_2 = U = 220 \text{ В}.$$

Отсюда следует: $3U_2 + U_2 = 220$ В и $U_2 = 55$ В.

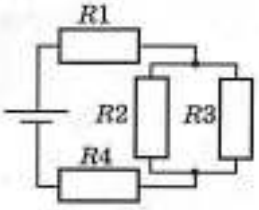


Рис. 5.17

РЕШИТЕ

57.1. Определите общее сопротивление внешнего участка электрической цепи, схематически показанной на рисунке 5.17.

57.2. Определите общее сопротивление внешнего участка электрической цепи, схематически показанной на рисунке 5.18.

57.3. Вольтметр с верхним пределом измерения напряжения 10 В имеет внутреннее сопротивление 5 кОм. Каким сопротивлением должен обладать дополнительный резистор для того, чтобы при его подключении верхний предел измерения стал равен 100 В?

57.4. Амперметр с верхним пределом измерения силы тока 10 А имеет внутреннее сопротивление 1 Ом. Каким сопротивлением должен обладать шунт для того, чтобы при его подключении верхний предел измерения амперметра стал равным 100 А?

57.5. Школьный вольтметр, рассчитанный на напряжение до 6 В, имеет сопротивление 700 Ом. Определите сопротивление дополнительного резистора, который должен быть к нему присоединён, чтобы с помощью этого вольтметра можно было измерять напряжение до 120 В. Во сколько раз при этом изменится цена деления вольтметра? Рассчитайте, какой длины надо взять провод из имеющихся в кабинете физики (с большим удельным сопротивлением) для изготовления такого дополнительного резистора.

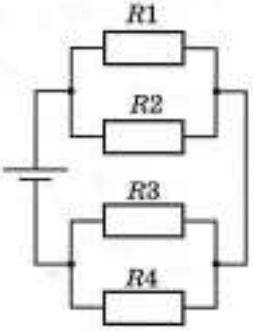


Рис. 5.18

57.6. До какого напряжения зарядится конденсатор C, присоединённый к источнику тока с ЭДС 3,6 В и внутренним сопротивлением 1 Ом по схеме, изображённой на рисунке 5.19? Какой заряд будет при этом на обкладках конденсатора, если его ёмкость равна 2 мкФ? $R_1 = 4$ Ом, $R_2 = 7$ Ом, $R_3 = 3$ Ом.

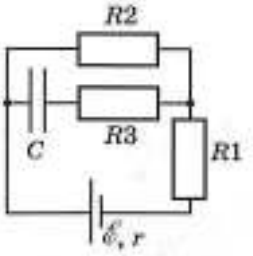


Рис. 5.19

57.7. Два одинаковых проводника сопротивлением $R = 100$ Ом каждый соединены параллельно; последовательно к ним присоединён проводник сопротивлением $R_1 = 200$ Ом и параллельно — конденсатор ёмкостью $C = 10$ мкФ. Цепь подключена к источнику постоянного тока. Определите ЭДС источника, если заряд на конденсаторе $q = 2{,}2 \cdot 10^{-4}$ Кл. Внутренним сопротивлением источника и сопротивлением проводов можно пренебречь.

57.8. Суммарная мощность, выделяющаяся на резисторах, сопротивления которых $R_1 = 8$ Ом и $R_2 = 2$ Ом, одинакова при их последовательном и параллельном подключении к источнику тока. Определите внутреннее сопротивление источника тока, питающего эти резисторы.

Возможности цифровых мультиметров. Правила работы с ними.

Выполните дома лабораторную работу № 2 в программе «Начала электроники».

§ 58. Правила Кирхгофа



Г. Кирхгоф

Повторите: электрическая цепь.

Пользуясь законом Ома, можно рассчитать силу тока на любом участке цепи. Проще всего рассчитывается сила тока в том случае, если внешняя цепь не содержит источников ЭДС.

Расчёты разветвлённых цепей, содержащих источники ЭДС, значительно сложнее. В соответствии с законом Ома для таких участков цепи в этих случаях требуются знания трёх величин: разности потенциалов на концах этого участка, ЭДС источника тока на этом участке и его полного сопротивления, включая внутреннее сопротивление источника тока. Для упрощения расчёта сложных электрических цепей немецким физиком Г. Кирхгофом (1824—1887) на основе закона Ома сформулированы правила, называемые *правилами Кирхгофа*.

Рассмотрим цепь, в некоторых точках которой (*1* и *3*) соединяются три проводника (рис. 5.20).

ЗАПОМНИТЕ Точки разветвлённой цепи, в которых сходится не менее трёх проводников, называются **узлами** цепи.

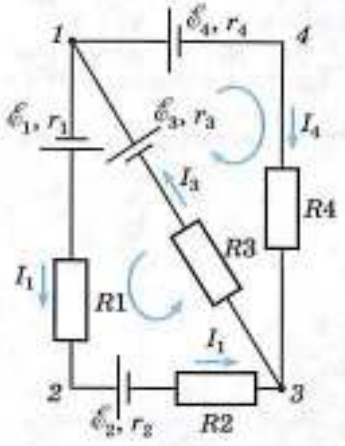


Рис. 5.20

В узлах не может происходить накопление зарядов или разрыв потока упорядоченно движущихся частиц. Суммарный ток, входящий в узел, равен суммарному току, выходящему из узла.

Если ток входит в узел, то силу тока считают положительной величиной; если выходит из узла, то отрицательной.

Первое правило Кирхгофа относится к узлам цепи.

ПЕРВОЕ ПРАВИЛО КИРХГОФА

Алгебраическая сумма сил токов для каждого узла равна нулю:

$$I_1 + I_2 + I_3 + \ldots + I_n = 0.$$

Для узла, показанного на рисунке 5.21, I_1 и I_2 — величины положительные, а I_3, I_4 и I_5 — отрицательные.

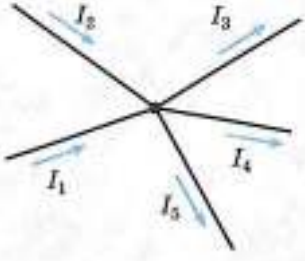


Рис. 5.21

Второе правило Кирхгофа относится к отдельным замкнутым контурам цепи.

ВТОРОЕ ПРАВИЛО КИРХГОФА

Алгебраическая сумма ЭДС в замкнутом контуре равна алгебраической сумме произведений сил токов и сопротивлений каждого из участков этого контура.

Рассмотрим замкнутый контур *1*, *2*, *3* (см. рис. 5.20).

Чтобы учесть знаки ЭДС и сил токов на каждом участке цепи, выберем направление обхода контура. На рисунке 5.20 это направление указано стрелкой. Если на данном участке источник тока создаёт ток, совпадающий по направлению с выбранным направлением обхода контура, то ЭДС считается положительной, в противном случае — отрицательной.

Аналогично если произвольно выбранное направление тока совпадает с направлением обхода, то силу тока считают положительной, в противном случае — отрицательной. О правильности выбранного знака силы тока судят по окончательному знаку, полученному в результате вычислений.

Применив первое правило Кирхгофа к узлу *1* и второе правило к контурам *1*, *2*, *3*, *1* и *1*, *4*, *3*, *1*, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \mathscr{E}_1 - \mathscr{E}_2 + \mathscr{E}_3 = I_1(R_1 + R_2 + r_1 + r_2) + I_3(R_3 + r_3), \\ \mathscr{E}_3 - \mathscr{E}_4 = I_4(R_4 + r_4) + I_3(R_3 + r_3), \\ I_3 - I_1 - I_4 = 0. \end{cases}$$

Мы получили линейную систему из трёх уравнений с тремя неизвестными значениями сил токов I_1, I_3, I_4. Решение этой системы при известных числовых значениях ЭДС и сопротивлений не вызывает трудностей.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

1. Число составляемых уравнений должно соответствовать числу неизвестных.
2. Составляя уравнения, надо следить, чтобы в каждое последующее уравнение входила хотя бы одна неизвестная величина, которая не входила в предыдущие уравнения.
3. Для каждого контура направление его обхода, определяющее знаки сил токов и ЭДС, выбирают произвольно. Если в результате решения задачи получают отрицательное значение для силы тока на каком-то участке, то это означает, что ток на этом участке идёт в направлении, противоположном выбранному обходу контура.

Узел электрической цепи. Правила Кирхгофа. Направление обхода контура

1. Следствием чего является первое правило Кирхгофа? второе правило Кирхгофа? 2. Какие требования следует учитывать, применяя правила Кирхгофа к расчёту цепей?

ЗАДАЧА. На рисунке 5.22 показана схема цепи, собранной для зарядки аккумулятора. Источник тока имеет ЭДС $\mathscr{E}_1 = 22$ В и внутреннее сопротивление $r_1 = 0{,}2$ Ом. ЭДС заряжаемого аккумулятора $\mathscr{E}_2 = 10$ В и его внутреннее сопротивление $r_2 = 0{,}6$ Ом. В цепь включены переменный резистор сопротивлением $R = 10$ Ом и осветительная лампа сопротивлением $R_3 = 48$ Ом. Рассчитайте силы токов на всех участках цепи.

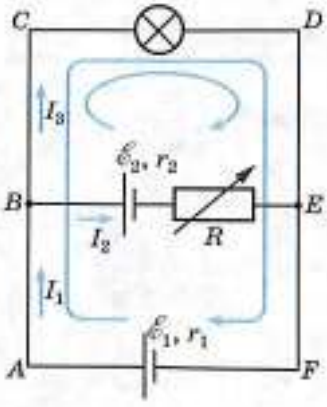


Рис. 5.22

Решение. Направления токов в узлах и выбранные направления обхода контуров показаны на рисунке 5.22.

Из первого правила Кирхгофа в применении к узлу B следует:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0. \quad (1)$$

В уравнении для второго узла нет необходимости. Оно не даст ничего нового, так как в него войдут те же значения сил токов.

Второе правило Кирхгофа в применении к контурам $BCDEB$ и $ACDFA$ даст следующие уравнения:

$$\mathscr{E}_2 = I_3R_3 - I_2(r_2 + R); \quad (2)$$

$$\mathscr{E}_1 = I_3R_3 + I_1R_1. \quad (3)$$

Отметим, что в составлении уравнения для контура $ABEFA$ нет необходимости, так как в него не вошли бы новые величины.

Итак, получены три уравнения, в которые входят три искомые величины. Решать их в общем виде нет смысла, поскольку они относятся к конкретной задаче. Поэтому, подставив числовые значения известных величин, получим $I_1 - I_2 - I_3 = 0$, $48I_3 - 10{,}6I_2 = 10$, $48I_3 + 0{,}2I_1 = 22$.

Подставив в третье уравнение $I_1 = I_2 + I_3$, получим систему из двух уравнений с двумя неизвестными: $\begin{cases} 48I_3 - 10{,}6I_2 = 10, \\ 48{,}2I_3 + 0{,}2I_2 = 22. \end{cases}$

Умножив первое уравнение на 0,2, а второе — на 10,6, имеем

$$9{,}6I_3 - 2{,}12I_2 = 2; \qquad 510{,}92I_3 + 2{,}12I_2 = 233{,}2.$$

Сложив оба уравнения, исключим I_2. Следовательно, $520{,}52I_3 = 235{,}2$. Отсюда $I_3 = 0{,}452$ А.

Подставив это значение в любое из уравнений, содержащее I_2, получим $9{,}6 \cdot 0{,}452 - 2{,}12I_2 = 2$, откуда $I_2 = 1{,}10$ А. Сила тока через источник тока $I_1 = I_2 + I_3 = 1{,}55$ А.

РЕШИТЕ

58.1. Два источника тока с ЭДС $\mathscr{E}_1$ и $\mathscr{E}_2$ и внутренними сопротивлениями r_1 и r_2 включены так, как показано на рисунке 5.23. Определите силы токов через источники и силу тока через перемычку AB, сопротивление которой примите равным нулю.

58.2. Два гальванических элемента, ЭДС которых одинаковы и равны $\mathscr{E} = 2$ В, соединены параллельно и замкнуты на резистор R (рис. 5.24). Внутренние сопротивления элементов равны соответственно $r_1 = 1$ Ом и $r_2 = 2$ Ом. Чему равно сопротивление резистора R, если сила тока в первом элементе равна $I_1 = 1$ А? Определите силы токов во втором элементе и резисторе.

58.3. Какой заряд q пройдёт через ключ при его замыкании (рис. 5.25)?



Рис. 5.23

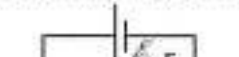


Рис. 5.24



Рис. 5.25

ОТВЕТЬТЕ НА ИТОГОВЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ

1. Опишите принцип действия источника тока.

2. Постройте график зависимости $\rho = f(N)$, где N — номер элемента (металла) в периодической системе Менделеева, а ρ — удельное электрическое сопротивление соответствующего металла (значения удельных сопротивлений возьмите из таблицы). Различаются ли значения удельного сопротивления для металлов и сплавов? Попробуйте найти объяснение полученной зависимости на основе представлений о строении вещества.

3. Дайте определение физической величины — удельного сопротивления вещества.

4. Объясните понятие «короткое замыкание». Выясните у родителей, как защищена от короткого замыкания электрическая сеть вашей квартиры.

5. Поясните разницу между реостатом и потенциометром.

1. Алессандро Вольта и его исследования. Вольтов столб.
2. Электрические рыбы.
3. Изготовьте **простейший гальванический элемент** (разновидность элемента Вольты (см. рис.)).



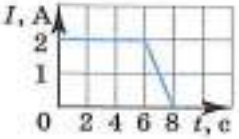
Этот источник может состоять из стальной и медной пластин, разделённых слоем бумаги или ткани, пропитанной водопроводной водой. Если элемент не будет работать, в воду добавьте поваренной соли (примерно половину чайной ложки на стакан воды).

Исследуйте полученный источник.

Подберите наиболее эффективные пары металлов для изготовления электродов (можно попробовать, например, монеты из разных металлов: медные, серебряные, никелевые) и состав жидкости, которая смачивает ткань между ними (соки различных фруктов и овощей). Больший эффект даёт применение медных, цинковых или оловянных пластин.

Соединив несколько таких элементов, будем иметь батарею, пригодную для питания светодиода или лампочки.

ЕГЭ А1. На рисунке показана зависимость силы тока в проводнике от времени. Какой заряд прошёл по проводнику за 8 с?



1) 16 Кл 2) 14 Кл 3) 12 Кл 4) 6 Кл

А2. Сравните сопротивления резисторов *1*, *2*, *3*, для которых получены следующие вольт-амперные характеристики (см. рис.).

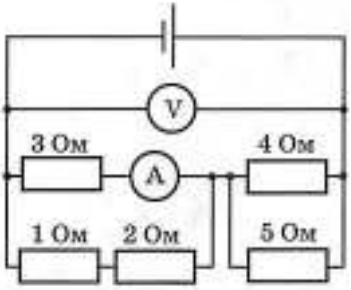


1) $R_1 > R_2 > R_3$
2) $R_3 > R_2 > R_1$
3) $R_1 = R_2 = R_3$
4) $R_1 > R_2 < R_3$

А3. Лампочка с вольфрамовой нитью соединена последовательно с источником тока и реостатом. При движении ползунка реостата лампочка горит всё ярче и ярче. При этом сила тока через нить

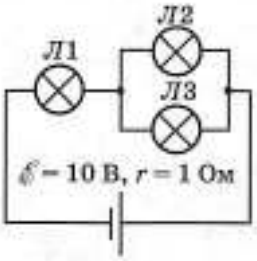
1) растёт наряду с её сопротивлением
2) растёт, а её сопротивление уменьшается
3) падает наряду с её сопротивлением
4) падает, а её сопротивление растёт

А4. Показание вольтметра на схеме 6,7 В. Каково показание амперметра? Сопротивления резисторов указаны на рисунке. Сопротивление амперметра не учитывайте.



1) 0,04 А
2) 0,9 А
3) 0,74 А
4) 1,34 А

С5. Три лампы с маркировкой *Л1* (3 В, 3 Ом), *Л2* (2 В, 1 А) и *Л3* (3 В, 4,5 Вт) соединены по схеме, показанной на рисунке. Какое количество теплоты выделится на лампе *Л3* за 1 мин? Считайте, что сопротивление ламп не зависит от температуры.



Глава 6. Магнитное поле

§ 59. Магнитное взаимодействие токов

Повторите: взаимодействие, электрический ток, электростатическая индукция.

Магнитное взаимодействие. Явления взаимного притяжения разноимённых и отталкивания одноимённых электрических зарядов во многом сходны с явлениями притяжения разноимённых и отталкивания одноимённых полюсов магнита. Однако попытки установить связь между электрическими и магнитными явлениями долгое время оставались безуспешными.



Х. Эрстед

В 1820 г. датский физик Х. Эрстед (1777—1851) заметил, что магнитная стрелка поворачивается при пропускании электрического тока через проводник, находящийся около неё (рис. 6.1). В том же году французский физик А. Ампер установил, что два проводника, расположенные параллельно друг другу, испытывают взаимное притяжение при пропускании через них электрического тока в одном направлении и отталкиваются, если токи идут в противоположных направлениях (рис. 6.2).



Рис. 6.1

На основании этих опытов Ампер пришёл к выводу, что взаимодействие тока с магнитом и магнитов можно объяснить, если предположить, что внутри магнита существуют незатухающие молекулярные круговые токи. Тогда все магнитные явления объясняются взаимодействием движущихся электрических зарядов, никаких особых магнитных зарядов в природе нет.



Рис. 6.2

ЗАПОМНИТЕ Притяжение или отталкивание электрически нейтральных проводников при пропускании через них электрического тока называют **магнитным взаимодействием** токов или **электродинамическим взаимодействием.**

Вспомним, что электрический ток — это упорядоченное движение электрических зарядов (см. § 54). Следовательно, магнитное взаимодействие — это взаимодействие упорядоченно движущихся электрических зарядов.

Магнитное поле. Магнитное взаимодействие движущихся электрических зарядов согласно представлениям теории поля объясняется тем, что

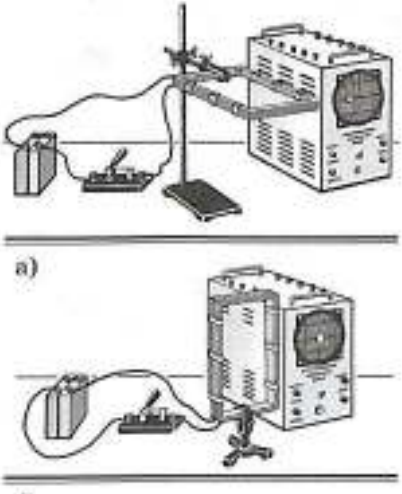
ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ всякий движущийся электрический заряд создаёт в окружающем пространстве магнитное поле, способное действовать на другие движущиеся электрические заряды.

Единица силы тока. Прохождение электрического тока может сопровождаться нагреванием и свечением вещества, различными его химическими превращениями, магнитным взаимодействием. Из всех действий электрического тока только магнитное действие наблюдается всегда и при любых условиях. Поэтому магнитное взаимодействие проводников с током используется в Международной системе (СИ) для определения единицы силы тока — ампера. Приведём принятое в настоящее время определение этой единицы.

ЗАПОМНИТЕ **Ампер** — сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу магнитного взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

Сила Ампера.

ЗАПОМНИТЕ Сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током, называется **силой Ампера**.



а)

б)

Рис. 6.3

Экспериментальное изучение магнитного взаимодействия показывает, что сила Ампера зависит от ориентации проводника в магнитном поле.

Для создания магнитного поля будем пропускать постоянный ток через провод, намотанный на прямоугольную рамку, а для обнаружения действия силы Ампера используем пучок электронов, летящих в электронно-лучевой трубке осциллографа. Такой пучок электронов эквивалентен проводнику с током. Опыт показывает, что при расположении электронного пучка параллельно проводнику с током этот пучок смещается к проводнику с током, если электроны в проводнике движутся в том же направлении, что и электроны в трубке (рис. 6.3, *а*). При противоположном направлении тока электронный пучок отталкивается от проводника с током.

При плавном изменении угла между электронным пучком и проводником с током плавно изменяется смещение яркого пятна (следа электронного пучка) на экране осциллографа. Этот опыт доказывает, что сила Ампера зависит от ориентации проводника в магнитном поле. Смещение пятна максимально при параллельном расположении электронного пучка и проводника с током, следовательно, сила Ампера в этом случае имеет максимальное значение. Если же электронный пучок перпендикулярен проводнику с током, то пятно на экране осциллографа не смещается, т. е. в этом случае магнитные силы на движущиеся электроны не действуют (рис. 6.3, *б*).

Магнитная индукция. Опыт также показывает, что сила Ампера пропорциональна силе тока I в проводнике и длине l той части проводника, которая находится в магнитном поле. Для максимального значения силы Ампера справедливо выражение

$$F_{max} = BIl. \qquad (59.1)$$

ЗАПОМНИТЕ Физическая величина B, являющаяся силовой характеристикой магнитного поля, называется **магнитной индукцией** или **индукцией магнитного поля**.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Магнитная индукция — векторная величина. Модуль вектора магнитной индукции равен отношению максимального значения силы Ампера, действующей на прямой проводник с током, к силе тока в проводнике и его длине:

$$B = \frac{F_{max}}{Il}.$$

Единица магнитной индукции. В Международной системе единиц за единицу магнитной индукции принята индукция такого магнитного поля, в котором на каждый метр длины проводника при силе тока 1 А действует максимальная сила Ампера 1 Н. Эта единица называется тесла (сокращённо: Тл) в честь выдающегося югославского физика Н. Тесла:

$$1\ \text{Тл} = \frac{1\ \text{Н}}{1\ \text{А} \cdot 1\ \text{м}} = 1\ \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

Направление вектора магнитной индукции. Направление вектора индукции $\vec{B}$ определяется *правилом левой руки*.

ПРАВИЛО ЛЕВОЙ РУКИ Если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная проводнику составляющая $\vec{B}_\perp$ вектора магнитной индукции $\vec{B}$ входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены по направлению тока, то отогнутый на 90° большой палец укажет направление силы, действующей на проводник.

Чтобы по известным направлениям силы тока и максимальной силы, действующей на проводник, определить направление вектора магнитной индукции, нужно расположить прямолинейный проводник в магнитном поле таким образом, чтобы сила Ампера имела максимальное значение. Раскрытую ладонь левой руки поместим в плоскости, проходящей через вектор силы Ампера и проводник с током. Четыре пальца руки расположим по направлению тока в проводнике, а большой палец, отогнутый в плоскости ладони под пря-

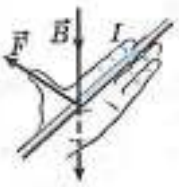


Рис. 6.4

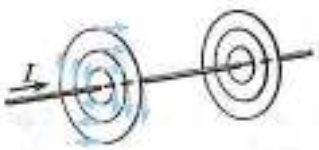


Рис. 6.5



Рис. 6.6

мым углом к остальным четырём пальцам, — по направлению силы Ампера. Тогда вектор индукции будет входить перпендикулярно в плоскость ладони (рис. 6.4).

Зависимость силы Ампера от угла между вектором магнитной индукции и проводником. Опыт показывает, что если расположить проводник с током под углом α к вектору магнитной индукции $\vec{B}$, то модуль силы Ампера определяется выражением

$$F_A = IBl\sin\alpha.$$

Следовательно, на проводник с током, расположенный вдоль вектора магнитной индукции, сила Ампера не действует.

Линии магнитной индукции.

ЗАПОМНИТЕ Линия, в любой точке которой вектор магнитной индукции $\vec{B}$ направлен по касательной к ней, называется **линией магнитной индукции.**

Линии магнитной индукции около прямого проводника с током являются окружностями, лежащими в плоскости, перпендикулярной проводнику; центры этих окружностей находятся на оси проводника (рис. 6.5).

Направление вектора магнитной индукции прямого проводника с током определяется следующим мнемоническим правилом: если смотреть вдоль проводника по направлению тока, т. е. по направлению движения положительных зарядов, то вектор магнитной индукции направлен по касательной к линии индукции в направлении хода часовой стрелки.

Однородное магнитное поле.

ЗАПОМНИТЕ Если в некоторой области пространства вектор индукции магнитного поля имеет одинаковое значение по модулю и одинаковое направление во всех точках поля, то магнитное поле в этом пространстве называется **однородным** (рис. 6.6).

Магнитный поток.

ЗАПОМНИТЕ Произведение модуля вектора индукции на площадь ΔS участка поверхности, перпендикулярной вектору индукции, называется **потоком вектора магнитной индукции** или **магнитным потоком** Φ.

В случае расположения вектора индукции под углом α к поверхности в однородном магнитном поле магнитный поток через плоскую площадку равен:

$$\Phi = BS\cos\alpha.$$

За единицу магнитного потока в СИ принят **вебер** (сокращённо: Вб). 1 Вб — это магнитный поток через поверхность площадью 1 м^2, расположенную в однородном магнитном поле перпендикулярно вектору индукции $\vec{B}$, равному по модулю 1 Тл:

$$1\ \text{Вб} = 1\ \text{Тл} \cdot 1\ \text{м}^2 = 1\ \text{Тл} \cdot \text{м}^2.$$

В магнитных полях линии индукции всегда замкнуты сами на себя, образуя вихревое поле. В результате замкнутая поверхность, помещённая в магнитное поле, пронизывается линиями магнитной индукции так, что любая линия, входящая в эту поверхность, выходит из неё.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Полный магнитный поток через произвольную замкнутую поверхность равен нулю.

Полученный результат является следствием того факта, что в природе нет магнитных зарядов и магнитные поля образуются только электрическими токами.

Магнитное взаимодействие. Магнитное поле. Сила Ампера. Магнитная индукция. Линии магнитной индукции. Магнитный поток

1. Как взаимодействуют параллельные проводники с током? 2. Как Ампер объяснял взаимодействие постоянных магнитов? 3. Какое явление используется для определения единицы силы тока в СИ? 4. Как определяется модуль вектора магнитной индукции? 5. В каких единицах выражается магнитная индукция? 6. Как определяется направление вектора магнитной индукции? 7. По какому правилу можно определить направление силы Ампера? 8. Что такое линия магнитной индукции? 9. Какую форму имеют линии индукции магнитного поля, созданного прямолинейным проводником с током? 10. Какое магнитное поле называется однородным? 11. Что называется магнитным потоком? 12. Что является единицей магнитного потока?

РЕШИТЕ 59.1. С какой силой действует однородное магнитное поле с индукцией 2,5 Тл на проводник длиной 50 см, расположенный под углом 30° к вектору индукции, при силе тока в проводнике 0,5 А?

59.2. Какой должна быть сила тока в обмотке якоря электродвигателя для того, чтобы на участок обмотки из 20 витков длиной 10 см, расположенный перпендикулярно вектору индукции в магнитном поле, действовала сила 120 Н? Магнитная индукция равна 1,5 Тл.

59.3. На прямолинейный участок проводника с током длиной 2 см между полюсами постоянного магнита действует сила 10^{-3} Н при силе тока в проводнике 5 А. Определите магнитную индукцию, если вектор индукции перпендикулярен проводнику.

Возьмите компас, установите направление линий магнитной индукции в вашем доме.

1. Земля — большой магнит.
2. Принцип действия компаса.

§ 60. Магнитное поле тока

Повторите: проводник с током.

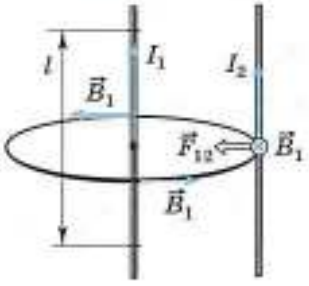


Рис. 6.7

Магнитная индукция прямого проводника с током. Опыт показывает, что сила Ампера, действующая со стороны магнитного поля, созданного очень длинным прямым проводником с током, на параллельный ему второй проводник с током, пропорциональна не только длине l второго проводника и силе тока I_2 в нём. Она также пропорциональна силе тока I_1 в первом проводнике и обратно пропорциональна расстоянию r между проводниками (рис. 6.7):

$$F = k' \frac{I_1 I_2 l}{r}. \qquad (60.1)$$

При параллельном расположении проводников сила Ампера максимальна. Её можно выразить через модуль индукции $\vec{B}_1$ магнитного поля, создаваемого электрическим током I_1, силу тока I_2 во втором проводнике и длину l второго проводника:

$$F_{12} = I_2 B l. \qquad (60.2)$$

Из формул (60.1) и (60.2) получаем, что магнитная индукция на расстоянии r от длинного прямого проводника с током I_1 определяется выражением

$$B_1 = \frac{k' I_1}{r}.$$

Коэффициент k' можно найти, воспользовавшись определением единицы силы тока (см. § 59). Согласно определению ампера сила взаимодействия равна $2 \cdot 10^{-7}$ Н, если $l = r = 1$ м и $I_1 = I_2 = 1$ А.

Подставляя эти значения в выражение (60.1), получаем

$$2 \cdot 10^{-7}\ \text{Н} = \frac{k' \cdot 1\ \text{А} \cdot 1\ \text{А} \cdot 1\ \text{м}}{1\ \text{м}},$$

откуда $k' = 2 \cdot 10^{-7}\ \text{Н/А}^2$.

Магнитная постоянная. Вместо коэффициента k' в расчётах в Международной системе единиц пользуются *магнитной постоянной* μ_0, которая связана с коэффициентом k' соотношением

$$k' = \mu_0 / 2\pi.$$

Отсюда магнитная постоянная равна:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \text{Н/А}^2 = 1{,}26 \cdot 10^{-6}\ \text{Н/А}^2.$$

Таким образом, в СИ индукция магнитного поля на некотором расстоянии от прямого проводника с током I выражается так:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}.$$

Формула для силы взаимодействия параллельных проводников с током в СИ примет вид

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r}.$$

Магнитное поле катушки и кругового тока. Внутри соленоида — цилиндрической катушки, длина l которой значительно больше радиуса r витка, модуль вектора индукции равен:

$$B = \mu_0 I n = \mu_0 I N / l, \qquad (60.3)$$

где N — общее число витков; $n = N/l$ — число витков провода на единицу длины катушки.

В центре кругового витка с током индукция магнитного поля равна:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r}.$$

Вектор индукции магнитного поля как в катушке, так и в центре витка с током направлен вдоль их оси. Направление вектора индукции связано с направлением тока мнемоническим *правилом буравчика* (правило Максвелла).

ПРАВИЛО БУРАВЧИКА

Если головка винта (буравчика) с правой резьбой вращается по направлению тока, то направление поступательного движения винта совпадает с направлением вектора индукции (рис. 6.8, *а*, *б*).

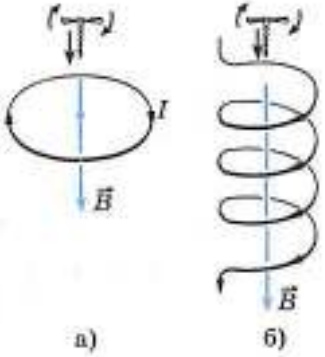


Рис. 6.8

Магнитная индукция прямого проводника с током. Магнитное поле катушки и кругового тока

1. Как изменится сила магнитного взаимодействия между двумя длинными параллельными проводниками при уменьшении силы тока в каждом из них в два раза? 2. Как изменится сила взаимодействия между двумя параллельными проводниками с током при уменьшении расстояния между ними в два раза?

РЕШИТЕ

60.1. Какая сила действует на каждый метр длины воздушных проводов троллейбусной линии, расположенных на расстоянии 52 см друг от друга, если сила тока в проводах 2000 А?

60.2. Вычислите индукцию магнитного поля внутри цилиндрической катушки длиной 10 см, содержащей 200 витков провода, при силе тока в катушке 5 А.

Понаблюдайте, как ведёт себя стрелка компаса вблизи холодильника, телевизора, компьютера.

§ 61. Сила Лоренца

Повторите: заряженные частицы.

Движение заряженных частиц в магнитном поле.

Если в проводнике длиной l упорядоченно движутся электрические заряды со средней скоростью v, то за время $t = l/v$ через поперечное сечение проводника пройдёт суммарный электрический заряд $Q = It = Il/v$. На этот проводник в магнитном поле с индукцией B действует сила Ампера $F_A = IBl\sin\alpha$. Но $Il = Qv$, следовательно, если мы в выражении для силы Ампера заменим произведение Il на Qv, то получим выражение для силы, действующей на суммарный движущийся заряд: $F = QBv\sin\alpha$. Разделив обе части равенства на число движущихся зарядов, определим силу, действующую на заряд одной частицы $q = Q/N$:

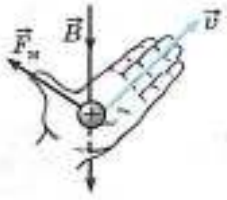


Рис. 6.9

$$F_л = qBv\sin\alpha,$$

где α — угол между векторами $\vec{v}$ и $\vec{B}$.

Направление силы $\vec{F}_л$ определяется правилом левой руки (рис. 6.9). Для случая движения отрицательно заряженных частиц пальцы левой руки следует располагать противоположно направлению вектора скорости.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ В однородном магнитном поле на заряженную частицу, движущуюся со скоростью v перпендикулярно линиям индукции магнитного поля, действует сила $F_л$, постоянная по модулю и направленная перпендикулярно вектору скорости (рис. 6.10).

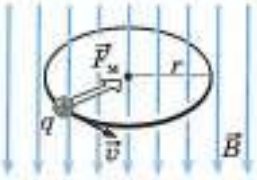


Рис. 6.10

Под действием магнитной силы частица приобретает ускорение, модуль которого равен:

$$a = \frac{F_л}{m} = \frac{qBv}{m}.$$

В однородном магнитном поле эта частица движется по окружности. Радиус окружности, по которой движется частица, определяется из условия $a = v^2/r$, откуда следует: $qvB/m = v^2/r$, т. е.

$$r = \frac{mv}{qB}. \qquad (61.1)$$

Период обращения частицы в однородном магнитном поле равен:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}. \qquad (61.2)$$

Последнее выражение показывает, что период обращения частицы в однородном магнитном поле не зависит от скорости и радиуса траектории её дви-

жения. Этот факт используется, например, в ускорителе заряженных частиц — циклотроне.

Циклотрон. В этом ускорителе заряженные частицы — протоны, ядра атомов гелия (альфа-частицы) или ионизованные атомы других элементов разгоняются переменным электрическим полем постоянной частоты в вакууме в зазоре между двумя пустотелыми металлическими электродами специальной формы — *дуантами*. Дуанты находятся между полюсами постоянного электромагнита. Под действием магнитного поля внутри дуанта заряженные частицы движутся по дуге окружности. К моменту времени, когда они совершат половину оборота и подойдут к зазору между дуантами, направление вектора напряжённости электрического поля между ними изменится на противоположное и частицы вновь испытают ускорение. Каждую следующую половину оборота частицы пролетают по окружности всё большего радиуса (рис. 6.11), но период их обращения остаётся неизменным.



Рис. 6.11

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Для ускорения частиц на дуанты подаётся переменное напряжение с постоянным периодом, равным периоду обращения частицы: $T_{напр} = T_{обр} = 2\pi m/(qB)$. Это равенство называется *условием синхронизации*.

Ускорение частиц в циклотроне с постоянным периодом возможно лишь до значений скоростей, значительно меньших скорости света в вакууме. При скорости частицы, близкой к скорости света в вакууме, равной $c = 300\,000$ км/с, период её обращения в магнитном поле возрастает. Равенство периода обращения частицы и периода изменения электрического поля, т. е. условие синхронизации, нарушается, ускорение частицы в циклотроне прекращается. Для ускорения частиц до скоростей, близких к скорости света в вакууме, служат другие ускорители — фазотроны, синхротроны, синхрофазотроны.

Движение заряженных частиц, влетающих в магнитное поле под любым углом к вектору индукции. Заряженная частица, влетающая в однородное магнитное поле со скоростью $\vec{v}$ под углом α к вектору индукции $\vec{B}$, движется по винтовой линии. Докажем это.

Разложим вектор скорости $\vec{v}$ на две составляющие — вектор $\vec{v}_{\parallel}$, направленный вдоль вектора индукции, и вектор $\vec{v}_{\perp}$, направленный перпендикулярно вектору индукции магнитного поля (рис. 6.12). Вдоль вектора $\vec{v}_{\parallel}$ на заряженную частицу никакие силы не действуют, и в этом направлении частица движется равномерно со скоро-

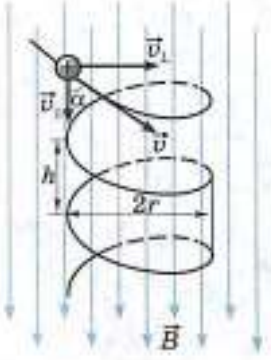


Рис. 6.12

стью $\vec{v}_{\parallel} = v\cos\alpha$. На частицу действует сила, перпендикулярная составляющей $\vec{v}_{\perp}$. Под действием этой силы, равной по модулю

$$F_л = qBv_{\perp} = qBv\sin\alpha,$$

заряженная частица будет двигаться по окружности в плоскости, перпендикулярной вектору индукции.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Результирующая траектория будет иметь вид винтовой линии с радиусом обращения $r = \dfrac{mv_{\perp}}{qB} = \dfrac{mv\sin\alpha}{qB}$ (см. формулу (61.1)) и шагом винта $h = v_{\parallel}T = 2\pi mv\cos\alpha/(qB)$ (см. формулу (61.2)).

На этом явлении основано применение некоторых технических устройств и механизмов, оно также выполняет важную роль в природе, в частности в астрофизических явлениях.

ИНТЕРЕСНО Для осуществления управляемых термоядерных реакций необходимо, чтобы частицы высокотемпературной плазмы — практически полностью ионизованного газа — не сталкивались со стенками сосуда и тем самым не передавали им свою энергию. Для реализации этого условия физики И. Е. Тамм (1895—1971) и А. Д. Сахаров (1921—1989) в 1950 г. предложили использовать магнитную термоизоляцию.

В вакуумной кольцевой камере создаётся сильное магнитное поле, линии магнитной индукции которого направлены вдоль стенок камеры. Заряженные частицы движутся, как бы навиваясь на линии индукции, и не испытывают столкновений со стенками камеры (рис. 6.13). Такие камеры применяются в установках «Токамак» для получения плазмы, нагретой до десятков миллионов кельвинов.

Своеобразной защитой для всего живого на Земле от потоков заряженных частиц из космоса является магнитное поле Земли. Быстрые заряженные частицы, электроны и протоны, выбрасываемые Солнцем, образуют так называемый солнечный ветер. В магнитном поле Земли траектории движения частиц изменяются, и они огибают Землю (рис. 6.14). На расстояниях примерно от 500 до 60 000 км заряженные частицы движутся, навиваясь на линии индукции магнитного поля Земли (рис. 6.15), совершая колебания от одного по-



И. Е. Тамм



А. Д. Сахаров

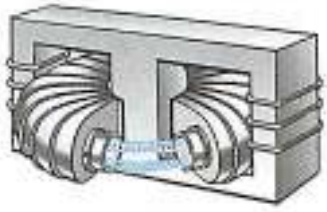


Рис. 6.13

люса до другого за 0,1—1 с. Эта область космоса называется радиационным поясом Земли.

Лишь в полярных областях небольшая часть этих частиц вторгается в верхние слои атмосферы из радиационного пояса Земли и вызывает полярные сияния.

Сила Лоренца. В одной и той же области пространства могут одновременно существовать электрическое и магнитное поля, их действия на заряженные частицы независимы.

ЗАПОМНИТЕ Сила $\vec{F}_Л$, действующая на заряженные частицы со стороны электрического и магнитного полей, называется **обобщённой силой Лоренца**:

$$\vec{F}_Л = \vec{F}_э + \vec{F}_м.$$

В частном случае если напряжённость электрического поля равна нулю, то сила Лоренца $\vec{F}_Л$ равна магнитной силе $\vec{F}_м$:

$$F_Л = qBv\sin\alpha.$$

Определение удельного заряда и массы иона. По траектории движущегося иона в соответствии с формулой (61.1) можно определить удельный заряд частицы q/m, а при известном заряде — её массу. Рассмотрим принцип действия прибора масс-спектрометра, схематически изображённого на рисунке 6.16. Через систему из трёх диафрагм пропускается пучок положительно заряженных ионов, имеющих различные скорости. В пространстве между диафрагмами *1* и *2* создано электрическое поле с напряжённостью $\vec{E}_0$ (вектор $\vec{E}_0$ лежит в плоскости чертежа) и магнитное поле с индукцией $\vec{B}_0$ (вектор $\vec{B}_0$ направлен перпендикулярно плоскости чертежа к нам). За диафрагмой *3* создано однородное магнитное поле с индукцией $\vec{B}$, причём вектор $\vec{B}$ перпендикулярен плоскости чертежа и направлен от нас.

Диафрагмы *1* и *2* образуют «фильтр скоростей». В самом деле, на ион, движущийся между ними, действуют в противоположных направлениях две силы: электрическая, по модулю равная $F_э = qE_0$, и магнитная, модуль

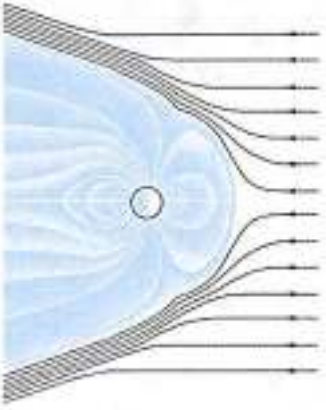


Рис. 6.14



Рис. 6.15



Рис. 6.16

которой равен $F_м = qvB_0$. Через диафрагму *2* пролетят лишь те ионы, для которых эти силы уравновешены, т. е. $F_э = F_м$, или $qE_0 = qvB_0$, откуда $v = E_0/B_0$. Ионы, движущиеся с другими скоростями, отклонятся либо вправо, либо влево и через фильтр не пройдут.

Ионы, пролетевшие через диафрагму *3*, под действием поперечного магнитного поля описывают полуокружности, радиусы которых равны $r = mv/(qB)$ (см. формулу (61.1)). Но так как у всех ионов, прошедших «фильтр скоростей», скорости одинаковы, то радиус полуокружности определяется только удельным зарядом иона q/m. Измеряя радиус и зная значения постоянной для данного прибора величины v/B и заряда q, определяют массу иона $m = \frac{qBr}{v}$.

Именно с помощью такого и аналогичных масс-спектрометров были определены массы атомов всех элементов, обнаружены изотопы.

Движение заряженных частиц в магнитном поле. Сила Лоренца. Циклотрон. Удельный заряд электрона

1. Как определяется модуль силы, действующей со стороны магнитного поля на движущуюся заряженную частицу? 2. По какой траектории движется заряженная частица в однородном магнитном поле? 3. От чего зависит радиус окружности, по которой движется заряженная частица в однородном магнитном поле? 4. От чего зависит период обращения заряженной частицы в однородном магнитном поле? 5. Каков принцип действия циклотрона? 6. Для чего используется магнитное поле в установках для получения высокотемпературной плазмы? 7. Что такое сила Лоренца? 8. Как определить удельный заряд иона? массу иона?

РЕШИТЕ

61.1. Вычислите радиус окружности, по которой будет двигаться электрон в однородном магнитном поле с индукцией 10^{-4} Тл, если вектор скорости электрона направлен перпендикулярно вектору индукции, а модуль скорости равен 10^6 м/с.

61.2. Как изменится период обращения заряженной частицы в однородном магнитном поле при увеличении магнитной индукции в три раза?

61.3. До какой энергии происходит ускорение протонов в циклотроне, радиус дуантов которого равен 0,75 м? Индукция магнитного поля равна 1,4 Тл.

1. Солнечный ветер.
2. Полярные сияния.

§ 62. Магнитное поле в веществе

Повторите: строение вещества, свойства среды.

Ферромагнетики. Электростатическое взаимодействие неподвижных зарядов зависит от свойств среды, в которой они находятся. Опыт показывает, что от свойств среды зависит и магнитное взаимодействие токов. Если около большой катушки подвесить на двух тонких проводах маленькую катушку (рис. 6.17), то при подключении катушек к источнику тока наблюдается отклонение маленькой катушки от вертикального положения. При внесении в большую катушку железного сердечника отклонение маленькой катушки существенно увеличивается. Увеличение силы Ампера, действующей на маленькую катушку, показывает, что индукция магнитного поля, создаваемого током в большой катушке, увеличивается при внесении железного сердечника в катушку.



Рис. 6.17

ЗАПОМНИТЕ Вещества, которые значительно усиливают магнитное поле, называются **ферромагнетиками**.

Кроме железа, к ферромагнетикам относятся никель, кобальт и некоторые сплавы.

Магнитная проницаемость.

ЗАПОМНИТЕ Физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция $\vec{B}$ магнитного поля в веществе отличается по модулю от индукции $\vec{B}_0$ магнитного поля в вакууме, называется **магнитной проницаемостью**:

$$\mu = B/B_0.$$

У ферромагнетиков значения магнитной проницаемости достигают нескольких десятков, сотен и даже тысяч единиц. Магнитная проницаемость ферромагнетиков не является постоянной величиной, она зависит от индукции намагничивающего поля $\vec{B}_0$.

ЗАПОМНИТЕ Зависимость процесса намагничивания ферромагнетиков от предыдущей истории намагничивания вещества называется **гистерезисом.**

На рисунке 6.18 показана так называемая *петля гистерезиса*. Её можно получить следующим образом. Изготовим сердечник из размагниченного ферромагнетика в форме тороида с малой поперечной прорезью и обмотаем его равномерно проводни-

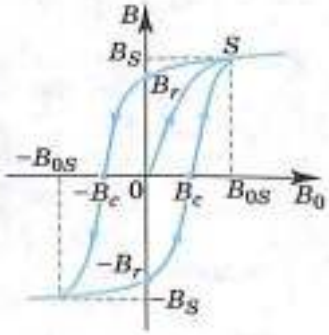


Рис. 6.18

ком. Меняя силу тока в обмотке, будем менять индукцию намагничивающего поля B_0. Индукцию магнитного поля будем измерять в зазоре.

Вначале индукция магнитного поля в ферромагнетике растёт вместе с увеличением индукции намагничивающего поля B_0. Этот рост изображён кривой $0S$.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Дальнейшее возрастание индукции намагничивающего поля ($B_0 > B_{0S}$) не приводит к увеличению индукции поля в ферромагнетике, индукция сохраняет постоянное значение B_S, называемое *намагниченностью насыщения*.

Уменьшая силу тока в обмотке, мы будем уменьшать индукцию намагничивающего поля B_0 и тем самым индукцию поля в ферромагнетике. При этом мы увидим, что индукция поля в сердечнике в процессе его размагничивания остаётся всё время большей, чем в процессе намагничивания.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Когда сила тока в обмотке станет равна нулю, исчезнет и намагничивающее поле. Но сердечник сохранит остаточную намагниченность — *остаточную индукцию* B_r.

Чтобы полностью размагнитить ферромагнитный сердечник, надо через обмотку пропустить ток противоположного направления и тем самым создать магнитное поле с противоположно направленной индукцией ($-B_c$).

ЗАПОМНИТЕ Значение индукции B_c, при которой сердечник размагничивается, называется **коэрцитивной силой**.

Если далее увеличивать силу тока в обмотке, то процесс намагничивания повторится до насыщения. Затем можно повторить процесс размагничивания, и мы получим на графике замкнутую петлю гистерезиса.

ИНТЕРЕСНО Форма гистерезисной петли и значение коэрцитивной силы определяют область применения тех или иных ферромагнетиков. Материалы с малой коэрцитивной силой называются *магнитно-мягкими*. Эти материалы используются для изготовления сердечников электромагнитов, трансформаторов, машин постоянного и переменного тока (генераторов, двигателей). На рисунке 6.19 изображена гистерезисная петля магнитно-мягкого материала.

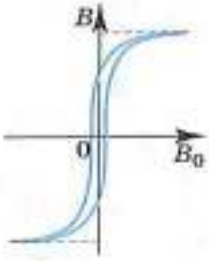


Рис. 6.19

Магнитно-твёрдыми (или *магнитно-жёсткими*) называются материалы с большим значением коэрцитивной силы, которые трудно размагнитить (см. рис. 6.18). Эти материалы используются для изготовления постоянных магнитов.

Парамагнетики и диамагнетики. Если в опыте по обнаружению магнитного взаимодействия катушек с током в большую катушку (см. рис. 6.17) вносить стержни из меди, алюминия, стекла, фарфора, дерева и т. п., то существенного изменения отклонения маленькой катушки заметить не удаётся.

Однако эксперименты с применением более чувствительных приборов позволяют установить, что все вещества способны в той или иной мере намагничиваться. По характеру производимых изменений внешнего поля неферромагнитные вещества делятся на парамагнетики и диамагнетики.

ЗАПОМНИТЕ **Парамагнетиками** называют вещества, которые слабо намагничиваются в направлении индукции внешнего поля.

Магнитная проницаемость даже наиболее сильных парамагнетиков мало отличается от единицы: 1,00036 у платины и 1,0034 у жидкого кислорода.

ЗАПОМНИТЕ **Диамагнетиками** называются вещества, которые слабо намагничиваются в направлении, противоположном индукции намагничивающего поля, т. е. они ослабляют внешнее магнитное поле.

Диамагнитными свойствами обладают, например, серебро, свинец, кварц, большинство газов. Магнитная проницаемость диамагнетиков отличается от единицы не более чем на десятитысячные доли. Самый сильный из диамагнетиков — висмут — обладает магнитной проницаемостью, равной 0,999824.

Природа диа- и парамагнетизма*. Электроны в оболочке атомов вещества движутся по различным орбитам. Если для упрощения считать эти орбиты круговыми, то каждый электрон, обращающийся вокруг атомного ядра, можно рассматривать как круговой электрический ток.

ЗАПОМНИТЕ Каждый электрон как круговой ток создаёт магнитное поле, которое называется **орбитальным**. Кроме того, у электрона в атоме есть собственное магнитное поле, называемое **спиновым** (от англ. *spin* — вращение, т. е. электрон как бы вращается как волчок).

У атомов одних веществ магнитные поля электронов полностью скомпенсированы. У этих веществ при отсутствии внешнего магнитного поля атомы (и молекулы) не имеют собственного магнитного поля. Эти вещества являются *диамагнетиками*. Под действием внешнего магнитного поля орбитальное движение электронов меняется таким образом, что компенсация орбитальных магнитных полей нарушается. При этом вектор индукции орбитального магнитного поля атома оказывается направленным *против* индукции внешнего поля. Поэтому диамагнетик выталкивается из внешнего магнитного поля.

Диамагнитный эффект присущ всем веществам, но проявиться он может лишь у тех веществ, у которых орбитальные и спиновые магнитные поля атомов скомпенсированы.

У других веществ магнитные поля электронов в атомах скомпенсированы не полностью, и атом в целом оказывается подобным маленькому постоянному магниту. Обычно в веществе все эти маленькие магниты ориентированы произвольно, и суммарная магнитная индукция всех их полей равна нулю (рис. 6.20). Если же поместить вещество в магнитное поле, то все маленькие магниты-атомы повернутся во внешнем магнитном поле, подобно стрелкам компаса. Векторы

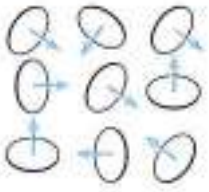


Рис. 6.20

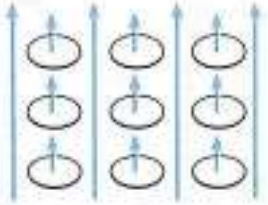


Рис. 6.21

индукции магнитных полей атомов оказываются преимущественно направленными примерно вдоль направления вектора индукции внешнего поля, поэтому магнитное поле в веществе усиливается (рис. 6.21). Этот эффект называется *парамагнитным*. Вещества, в которых этот эффект проявляется, называются *парамагнетиками*.

Заметим, что полная ориентация магнитных полей атомов возможна только вблизи абсолютного нуля.

Природа ферромагнетизма. Домены*. Ферромагнетизм также качественно объясняется магнитными свойствами электронов. Каждый электрон в атоме обладает собственным (спиновым) магнитным полем. Во всех газах, жидкостях и в большинстве кристаллов спиновые магнитные поля взаимно компенсируются за счёт попарной антипараллельной ориентации спинов электронов в атомах, молекулах или кристаллах. Лишь в некоторых кристаллах, например в кристаллах железа, возникают условия для параллельной ориентации векторов индукции спиновых магнитных полей части электронов и их сложения. В результате этого внутри кристалла ферромагнетика возникают намагниченные области протяжённостью 10^{-2}—10^{-4} см.

ЗАПОМНИТЕ Области самопроизвольного намагничивания называют **доменами** (рис. 6.22).

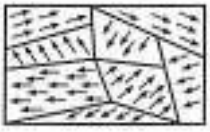


Рис. 6.22

В разных доменах индукции магнитных полей имеют различные направления, и в большом кристалле поля взаимно компенсируют друг друга. При внесении ферромагнитного образца во внешнее магнитное поле происходит смещение границ отдельных доменов так, что объём доменов, ориентированных по внешнему полю, увеличивается. Поэтому с увеличением индукции внешнего поля B_0 возрастает магнитная индукция намагниченного вещества.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ При значениях индукции внешнего поля $B_0 \gg B_{0S}$ смещение границ доменов достигает максимально возможного значения, так как все домены оказываются ориентированными вдоль индукции внешнего поля (рис. 6.23). Поэтому возрастание магнитной индукции B с увеличением магнитной индукции B_0 внешнего поля прекращается (см. рис. 6.18). Это явление называется *магнитным насыщением*.

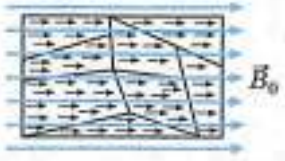


Рис. 6.23

Постоянные магниты. При вынесении ферромагнитного образца из внешнего магнитного поля значительная часть доменов сохраняет упорядоченную ориентацию. Магнитно-твёрдый образец становится *постоянным магнитом*. Для изготовления постоянных магнитов используются специальные стали, сплавы железа с алюминием, никелем и кобальтом, оксиды железа и некоторых других металлов.

Температура Кюри. Упорядоченная ориентация магнитных полей атомов в доменах ферромагнетика может быть нарушена за счёт энергии тепловых колебаний атомов в кристалле. Чем выше температура кристалла, тем быстрее разрушается порядок в ориентации доменов, и образец размагничивается.

ЗАПОМНИТЕ Температура, выше которой вещество теряет ферромагнитные свойства и становится парамагнетиком, называется **температурой** (или **точкой**) **Кюри**.

Температура Кюри у железа 770 °С, у кобальта 1130 °С, у никеля 356 °С.

Исчезновение ферромагнитных свойств при высокой температуре можно наблюдать в опыте с лезвием бритвы. При комнатной температуре оно притягивается к магниту, при нагревании в пламени отпадает от магнита, т. е. ферромагнитные свойства стального лезвия теряются.

После охлаждения образца его ферромагнитные свойства восстанавливаются, однако магнитно-твёрдый материал может стать магнитно-мягким. Дело в том, что в процессе отжига меняется структура кристаллической решётки, изменяются упругие, магнитные и другие свойства вещества.

Магнитное поле в веществе. Магнитная проницаемость. Парамагнетики и диамагнетики. Ферромагнетики. Домены. Температура Кюри. Коэрцитивная сила. Гистерезис

1. Какие вещества называются ферромагнетиками? 2. Как объясняются процессы намагничивания и размагничивания ферромагнитных материалов? 3. Что такое температура Кюри? 4. Какими магнитными свойствами обладают диамагнетики и парамагнетики? 5. Из каких магнитных материалов следует изготавливать сердечники трансформаторов — магнитно-мягких или магнитно-твёрдых?

Проведите опыт с лезвием бритвы, описанный в тексте параграфа.

1. Постоянные магниты.
2. Магнитная аномалия. Магниторазведка.

§ 63*. Электроизмерительные приборы

Повторите: измерение токов и напряжений.

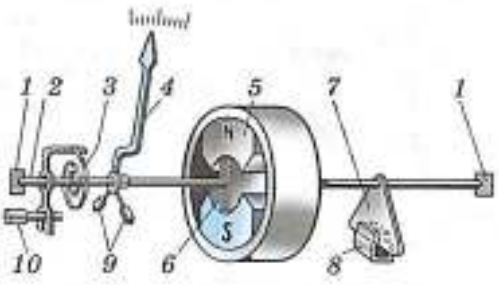


Рис. 6.24

В электроизмерительных приборах *магнитоэлектрической* системы используется действие магнитного поля на проводник с током (рис. 6.24). Измеряемый электрический ток пропускается через рамку *6*, помещённую в магнитное поле постоянного магнита *5*. Рамка укреплена на оси *2*, для уменьшения силы трения стальная ось *2* опирается на подпятники *1*, изготовленные из синтетического агата, рубина или корунда.

Измеряемый ток подводится к рамке *6* через спиральную пружину *3*. На участки проводников, расположенные перпендикулярно линиям индукции магнитного поля, действует сила Ампера. Если бы подвижная часть измерительного механизма не имела пружину *3*, противодействующую её повороту, то при пропускании тока через рамку происходил бы поворот её на 180° независимо от силы тока. Но силы упругости, возникающие при закручивании пружины, препятствуют повороту рамки.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Сила упругости прямо пропорциональна углу закручивания пружины, поэтому угол поворота, при котором наступает равенство моментов сил Ампера и сил упругости, пропорционален силе тока в рамке. Шкала магнитоэлектрического прибора равномерная.

При изменениях силы тока равновесие моментов сил упругости и сил Ампера нарушается, в результате подвижная система начинает совершать колебания относительно нового положения равновесия. Вместе с ней колеблется и стрелка прибора. Для устранения этих колебаний в приборах применяются специальные успокоители. В них для торможения подвижной системы используется тонкая алюминиевая пластина *7*, помещённая между полюсами постоянного магнита *8* и закреплённая на оси вращения подвижной системы. При повороте подвижной системы алюминиевая пластина успокоителя движется в поле постоянного магнита. Наводимые в ней при этом индукционные токи тормозят движение пластины и вместе с тем вращение всей подвижной системы электроизмерительного прибора.

Для того чтобы при любом положении указательной стрелки *4* подвижная часть была уравновешена в поле тяжести, имеются противовесы *9*. Установка на нулевое деление шкалы производится с помощью корректора *10*.

Поворот стрелки в приборах магнитоэлектрической системы пропорционален силе тока, проходящего через измерительную систему прибора. Однако шкала прибора может быть отградуирована и в единицах напряжения, так как

сила тока прямо пропорциональна напряжению, приложенному к выводам измерительной системы.

Приборы магнитоэлектрической системы применяются для измерения силы тока и напряжения в цепях постоянного тока.

В электроизмерительных приборах других систем подвижная часть обычно устроена примерно так же, как и в приборах магнитоэлектрической системы.

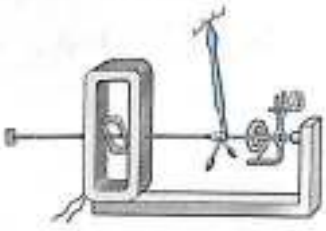


Рис. 6.25

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ В приборах *электродинамической* системы нет постоянного магнита. Поворот подвижной системы происходит в результате электродинамического взаимодействия электрических токов в двух катушках. Одна катушка закреплена неподвижно, а другая укреплена на оси подвижной системы (рис. 6.25).

Электродинамические приборы могут служить *ваттметрами* — приборами для измерения мощности. С этой целью неподвижную (токовую) катушку включают в цепь последовательно, а подвижную (катушку напряжения) через дополнительный резистор включают параллельно потребителю энергии. Вращающий момент, действующий на подвижную рамку, пропорционален произведению сил токов в обеих обмотках. Но сила тока в одной обмотке равна силе тока в рабочей цепи, а сила тока в другой пропорциональна напряжению на рабочем участке цепи и, таким образом, их произведение пропорционально мощности.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ В приборах *электромагнитной* системы измеряемый ток пропускается по неподвижной катушке, а поворот подвижной системы вызывается втягиванием в эту катушку стального сердечника, связанного с подвижной системой (рис. 6.26).

В приборах *электростатической* системы вращение подвижной системы вызывается силами электростатического взаимодействия разноимённо заряженных проводников.

Преимущество этих приборов заключается в том, что они не потребляют тока, т. е. не являются дополнительной нагрузкой, как приборы другой системы. Но они позволяют измерять только напряжение, но не силу тока.

Условные обозначения, позволяющие определить систему электроизмерительного прибора и его назначение, приведены в таблице 5.

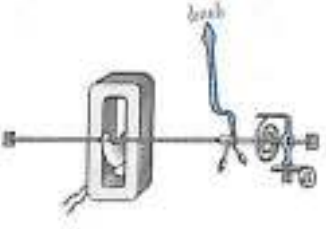


Рис. 6.26

Таблица 5

Измеряемая величина	Сила тока	A
	Напряжение	V
	Электрическое сопротивление	Ω
	Мощность	W

Продолжение

Система прибора	Магнитоэлектрическая Электромагнитная Электродинамическая Электростатическая	
Измеряемый ток	Постоянный Переменный Постоянный и переменный	— ~ ≂
Положение прибора при измерении	Вертикальное Горизонтальное Под углом 60°	⊥ — ∠60°

Погрешность прибора. Одной из важнейших характеристик электроизмерительных приборов является класс точности.

ЗАПОМНИТЕ Отношение максимально возможного значения абсолютной погрешности ΔA к максимальному значению измеряемой величины A_{max}, выраженное в процентах, называется **приведённой погрешностью прибора**:

$$\varepsilon_{пр} = \frac{\Delta A}{A_{max}} 100\,\%.$$

При отклонении стрелки на всю шкалу граница относительной погрешности прибора равна приведённой погрешности. При измерении меньших значений измеряемой величины относительная погрешность измерения превышает приведённую погрешность прибора.

По приведённой погрешности электроизмерительные приборы делятся на восемь классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Электроизмерительный прибор. Погрешность прибора

1. Как устроен электроизмерительный прибор магнитоэлектрической системы? 2. Почему приборы магнитоэлектрической системы пригодны для измерений только в цепях постоянного тока? 3. Для чего в электроизмерительных приборах нужны успокоители? 4. Как устроен измерительный прибор электродинамической системы?

§ 64*. Электрический двигатель постоянного тока

Повторите: сила Ампера.

Устройство электрических двигателей для преобразования электрической энергии в механическую основано на действии силы Ампера.

Основными частями электродвигателя постоянного тока (рис. 6.27) являются индуктор *4*, с помощью которого создаётся постоянное магнитное поле, якорь *3*, через обмотки которого пропускается ток, и коллектор *1* с электрическими щётками *2*, с помощью которых осуществляется соединение обмоток якоря с источником тока.

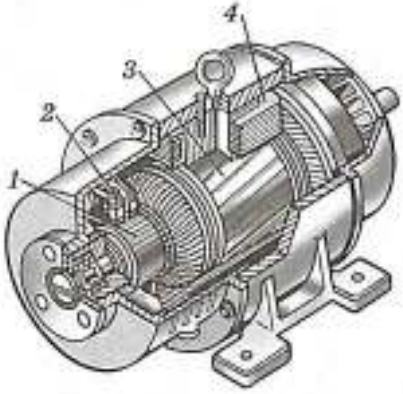


Рис. 6.27

В простейшей машине постоянного тока *индуктор* — это постоянный магнит или электромагнит со стальным сердечником. Обмотки электромагнита индуктора называются *обмотками возбуждения*. Магнит индуктора имеет полюсные наконечники такой формы, что между ними образуется отверстие цилиндрической формы. Между полюсными наконечниками индуктора помещается *якорь*. Якорь состоит из сердечника — стального цилиндра с пазами, параллельными оси цилиндра, и обмоток, вложенных в пазы сердечника. Выводы каждой обмотки соединены с медными контактами *коллектора*. Якорь насажен на ось, концы которой установлены в подшипниках, и может свободно вращаться вокруг этой оси.

К коллектору с двух противоположных сторон прижимаются *щётки* из графита или меди, щётки подключаются к источнику постоянного напряжения. При подключении напряжения в обмотке якоря идёт постоянный электрический ток и на провода обмотки со стороны магнитного поля действует сила Ампера.

В проводах обмотки, расположенных на противоположных сторонах якоря, направления сил Ампера противоположны друг другу, и под действием этих сил якорь приходит во вращение. При вращении якоря с помощью коллектора происходит отключение от щёток одной обмотки и подключение другой обмотки таким образом, что в каждый момент времени ток пропускается через ту обмотку якоря, в плоскости которой лежит вектор индукции магнитного поля индуктора. Сила Ампера, действующая на провода обмотки, в этом случае максимальна.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Основной рабочей характеристикой электродвигателя постоянного тока является вращающий момент, создаваемый на валу двигателя силой Ампера, действующей на проводник с током в обмотке якоря.

Момент пары сил, действующих на рамку с током, равен:

$$M = 2FrN,$$

где r — радиус ротора; N — число витков в обмотке. Из выражения (59.1) получаем

$$M = 2IBlrN,$$

где I — сила тока в обмотке; B — индукция магнитного поля; l — длина проводника.

Так как $2lr = S$ есть площадь рамки, а $BS = \Phi$ — максимальный магнитный поток через рамку, то вращающий момент на валу двигателя равен:

$$M = NI\Phi.$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Мы получили, что вращающий момент двигателя постоянного тока прямо пропорционален максимальному магнитному потоку Φ через виток обмотки, силе тока I в обмотке якоря и числу витков N в обмотке.

Скорость вращения якоря электродвигателя можно регулировать, изменяя силу тока в его обмотках; направление вращения можно изменять, изменяя направление тока в обмотке якоря или индуктора.

ИНТЕРЕСНО Электродвигатель постоянного тока может приводить в движение колёса электровоза, троллейбуса, трамвая, приводить в действие электробритву, магнитофон и другие бытовые электроприборы.

С помощью электродвигателя постоянного тока — стартера — производится запуск двигателя автомобиля. В качестве примера приведём некоторые технические характеристики стартера автомобиля «Жигули». Рабочее напряжение стартера 12 В, сила тока в обмотке якоря при максимальной мощности 260 А, частота вращения якоря 30 об/с.

Электрический двигатель постоянного тока

? 1. Каково устройство электродвигателя постоянного тока? 2. Каково назначение индуктора? 3. Как устроен якорь? 4. Каково назначение коллектора и щёток? 5. От чего зависит вращающий момент электродвигателя постоянного тока? 6. Как можно изменять направление вращения якоря электродвигателя? 7. Как можно изменять скорость вращения якоря электродвигателя?

РЕШИТЕ 64.1. Для подъёма грузов на валу электромотора постоянного тока укреплён барабан радиусом 10 см, на который наматывается трос. Определите максимальную массу груза, который можно поднять таким способом, если радиус якоря 5 см, длина участка обмотки, расположенного перпендикулярно вектору индукции, 15 см, число витков в обмотке 20, индукция магнитного поля 1,2 Тл, а максимальная сила тока в обмотке 20 А.

64.2. Двигатель потребляет из сети мощность 2 кВт. Максимальный магнитный поток через обмотку равен $1{,}1 \cdot 10^{-2}$ Вб, частота вращения равна 40 об/с. Сила тока в обмотке равна 20 А, число витков в обмотке равно 30. Определите коэффициент полезного действия двигателя.

ОТВЕТЬТЕ НА ИТОГОВЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ

1. Опишите классические опыты, иллюстрирующие магнитное взаимодействие.
2. Как графически изображается магнитное поле?
3. Дайте определение магнитной проницаемости вещества.
4. Опишите процесс взаимодействия вещества с магнитным полем.

1. История изобретения компаса.
2. Перелёт птиц на юг. (Как птицы находят дорогу?)

ЕГЭ

А1. Электромагнит представляет собой медный провод, намотанный на стальной сердечник. При силе тока I в сердечнике электромагнит удерживает гирю массой m. Для того чтобы этот электромагнит мог удерживать груз большей массы, не меняя формы сердечника, следует

1) уменьшить число витков
2) увеличить силу тока
3) заменить стальной сердечник на медный
4) изменить направление намотки провода на сердечник

А2. Укажите устройство, в котором используется явление возникновения силы, действующей на проводник в магнитном поле, при прохождении через проводник электрического тока.

1) реостат 2) металлоискатель 3) электродвигатель 4) электрочайник

А3. Максимальная сила, действующая в однородном магнитном поле на проводник с током длиной 10 см, равна 0,02 Н. Сила тока равна 8 А. Модуль вектора магнитной индукции этого поля равен

1) 0,00025 Тл 2) 0,025 Тл 3) 0,16 Тл 4) 1,6 Тл

А4. На проводник, расположенный в однородном магнитном поле под углом 30° к направлению линий магнитной индукции, действует сила F. Если увеличить этот угол в 3 раза, то на проводник будет действовать сила, равная

1) 0 2) $\frac{F}{2}$ 3) $2F$ 4) $3F$

А5. Два первоначально покоящихся электрона ускоряются в электрическом поле: первый в поле с разностью потенциалов U, второй — $4U$. Ускорившиеся электроны попадают в однородное магнитное поле, линии индукции которого перпендикулярны скорости движения электронов. Отношение радиусов кривизны траекторий первого и второго электронов в магнитном поле равно

1) $\frac{1}{4}$ 2) $\frac{1}{2}$ 3) $\frac{\sqrt{2}}{2}$ 4) $\sqrt{2}$

С6. С какой скоростью вылетает α-частица из радиоактивного ядра, если она, попадая в однородное магнитное поле индукцией $B = 2$ Тл перпендикулярно его силовым линиям, движется по дуге окружности радиусом $r = 1$ м (α-частица — ядро атома гелия, молярная масса гелия $M = 0{,}004$ кг/моль)?

Глава 7. Электромагнитная индукция

§ 65. Закон электромагнитной индукции

Повторите: индукция, электрический ток.

Индукционный ток. Электрические и магнитные поля порождаются одними и теми же источниками — электрическими зарядами. Поэтому можно было предположить, что между этими полями существует определённая связь. Это предположение нашло экспериментальное подтверждение в 1831 г. в опытах выдающегося английского физика М. Фарадея, в которых он открыл явление электромагнитной индукции.

Проведём опыты, подобные тем, которые выполнил Фарадей. Возьмём две катушки из медной проволоки и первую подключим к источнику постоянного тока, а вторую расположим над первой таким образом, чтобы магнитный поток, создаваемый электрическим током в первой катушке, пронизывал витки второй катушки. Подключив выводы второй катушки к чувствительному гальванометру, убедимся, что магнитный поток, пронизывающий вторую катушку, не создаёт в ней электрического тока (рис. 7.1).

Отключим первую катушку от источника тока. Опыт показывает, что при этом через вторую катушку и гальванометр в течение короткого промежутка времени проходит электрический ток. При замыкании цепи первой катушки ключом мы увидим, что во второй катушке снова проходит кратковременный электрический ток, но его направление противоположно направлению тока в первом опыте.

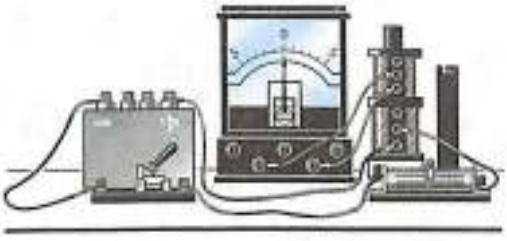


Рис. 7.1

Не отключая первой катушки от источника тока, изменим взаимное расположение катушек. Гальванометр обнаруживает возникновение электрического тока во второй катушке при любом её перемещении, сопровождающемся изменением магнитного потока через неё. Ток во второй катушке возникает и при перемещении относительно неё постоянного магнита (рис. 7.2).

При включении или выключении тока в первой катушке электрический ток во второй катушке возникает не всегда. Например, если плоскость, в которой лежат витки второй катушки, расположена параллельно вектору индукции магнитного поля, создаваемого первой катушкой, то электрический ток во второй катушке не возникает. В этом случае, хотя и происходит изменение магнитного потока в первой катушке, магнитный поток через вторую катушку всё время равен нулю.



Рис. 7.2

ЗАПОМНИТЕ Электрический ток, возникающий в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур, называется **индукционным током**.

Индукционное электрическое поле.

ЗАПОМНИТЕ Возникновение индукционного тока показывает, что на свободные электрические заряды в проводнике действует электрическое поле, которое называют **индукционным электрическим полем**.

Для вывода количественных соотношений, описывающих явления, связанные с этим полем, рассмотрим сначала явления, наблюдающиеся при движении проводника в магнитном поле.

Пусть в однородном магнитном поле движется проводник так, что вектор скорости его движения $\vec{v}$ перпендикулярен вектору магнитной индукции $\vec{B}$. На свободные электроны и положительные ионы, из которых состоит металлический проводник, действуют со стороны магнитного поля силы, направленные в противоположные стороны (рис. 7.3). Свободные электроны приходят в движение. Это приводит к разделению электрических зарядов в проводнике и возникновению внутри проводника электрического поля, создаваемого зарядами, накапливающимися на торцах проводника.

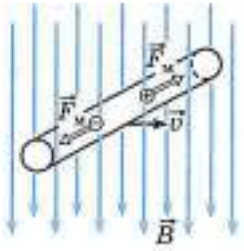


Рис. 7.3

Движение электронов в проводнике прекращается тогда, когда сила $\vec{F}_э$, действующая на электрон со стороны этого электрического поля, становится равной по модулю силе $\vec{F}_л$, действующей на него со стороны магнитного поля (рис. 7.4).

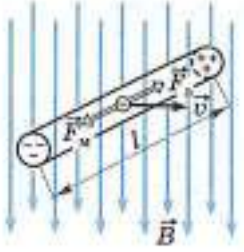


Рис. 7.4

Так как $F_э = eE_{инд}$, где $E_{инд}$ — модуль напряжённости кулоновского электрического поля, возникающего в проводнике в результате разделения зарядов, а $F_л = evB$, то условие равенства сил, действующих

на электрон со стороны электрического и магнитного полей, можно записать так:

$$eE_{кул} = evB,$$

откуда

$$E_{кул} = vB.$$

Если проводник прямолинейный и его длина равна l, то по напряжённости $\vec{E}_{кул}$ электрического поля внутри его можно определить напряжение U на концах проводника:

$$U = E_{кул}l = vBl.$$

Возникновение электрического тока в проводнике, движущемся относительно магнитного поля, объясняется уже известными физическими законами. Но достаточно мысленно перейти при наблюдении того же самого физического явления в инерциальную систему отсчёта, связанную с проводником, чтобы убедиться в том, что это явление принципиально новое. В системе отсчёта, связанной с равномерно движущимся проводником, наблюдаемое возникновение электрического тока и разделение зарядов нельзя объяснить действием магнитных сил — ведь они на неподвижные заряды не действуют!

Конечно, физический факт разделения электрических зарядов в проводнике и возникновения напряжения на его концах не зависит от выбора системы отсчёта. В системе отсчёта, связанной с проводником, электрические заряды неподвижны и магнитные силы на них не действуют.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Факт разделения зарядов в этом случае можно объяснить, если допустить, что в этой системе отсчёта возникает индукционное электрическое поле напряжённостью $\vec{E}_{инд}$, равной по модулю $\vec{E}_{кул}$, но направленной в противоположную сторону:

$$\vec{E}_{инд} = -\vec{E}_{кул}.$$

Электромагнитное поле. Рассмотрев движение проводника в магнитном поле, мы пришли к следующему выводу: в системе отсчёта, связанной с постоянным магнитным полем, нет индукционного электрического поля; в системе же отсчёта, связанной с движущимся проводником, существует индукционное электрическое поле. Следовательно, величины, описывающие электрические и магнитные поля, зависят от выбора системы отсчёта.

Как показал Дж. Максвелл, эта особенность электрического и магнитного полей объясняется следующим образом.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Исторически сложившиеся в физике представления об электрических и магнитных полях как самостоятельных сущностях не соответствуют истине. В действительности существует только одно поле — *электромагнитное поле* как особая форма материи. Это единое электромагнитное поле мы описываем в различных системах отсчёта по-разному.

В частности, возникновение индукционного тока мы описываем в системе отсчёта, связанной с движущимся в магнитном поле проводником, как действие индукционного электрического поля, а в системе отсчёта, связанной с неподвижными источниками постоянного магнитного поля (катушками,

постоянными магнитами), как действие этого магнитного поля на движущиеся заряды, т. е. как действие магнитных сил.

Электромагнитное поле никогда не исчезает при переходе из одной инерциальной системы в другую, но его характеристики меняются. В соответствии с исторически сложившейся традицией действие электромагнитного поля на электрический заряд представляют как результат действия двух полей — электрического и магнитного:

$$\vec{F}_{Л} = \vec{F}_{э} + \vec{F}_{м}.$$

(С силой Лоренца $\vec{F}_{Л}$ вы уже встречались в § 61.) При переходе из одной инерциальной системы отсчёта в другую могут изменяться обе составляющие силы Лоренца — электрическая $\vec{F}_{э}$ и магнитная $\vec{F}_{м}$, иногда одна из них может обратиться в нуль, однако физические явления будут протекать одинаково при одних и тех же начальных условиях (принцип относительности).

Закон электромагнитной индукции. Для установления количественных закономерностей, описывающих процесс возникновения индукционного тока, продолжим рассмотрение явлений, происходящих при движении проводника в магнитном поле. Пусть прямолинейный проводник длиной l движется вдоль «рельсов» в однородном магнитном поле перпендикулярно вектору магнитной индукции $\vec{B}$ с постоянной скоростью υ относительно магнитного поля. На свободные электроны в движущемся проводнике действуют магнитные силы, выполняющие в этом случае роль сторонних сил, которые и являются причиной возникновения индукционного электрического тока в контуре, образуемом движущимся проводником и неподвижными «рельсами», по которым он скользит (рис. 7.5).

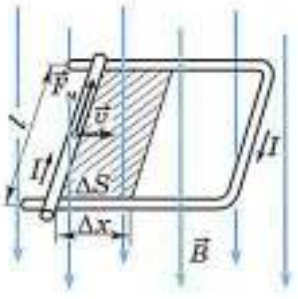


Рис. 7.5

ЭДС индукции в контуре равна:

$$\mathscr{E}_{инд} = A_{стор}/q = F_{стор}l/q = E_{инд}l. \qquad (65.1)$$

Подставив значение $E_{инд} = -\upsilon B$ в формулу (65.1), получим выражение для ЭДС индукции:

$$\mathscr{E}_{инд} = -\upsilon Bl. \qquad (65.2)$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Индукционный ток вызывает нагревание проводников в контуре. Это означает, что работа по перемещению электрических зарядов в индукционном электрическом поле по замкнутому пути не равна нулю. Следовательно, индукционное электрическое поле не является потенциальным. Такие поля называют *вихревыми*.

Во внешнем участке контура движение электрических зарядов происходит под действием кулоновского поля электрических зарядов, разделённых сторонней силой — силой Лоренца.

Умножив и разделив правую часть уравнения (65.2) на малый промежуток времени Δt, получим

$$\mathscr{E}_{инд} = -\upsilon Bl = \frac{-\upsilon \Delta t Bl}{\Delta t} = \frac{-\Delta x l B}{\Delta t} = \frac{-B\Delta S}{\Delta t}. \qquad (65.3)$$

Здесь ΔS — изменение площади контура, пронизываемого магнитным полем. В случае перпендикулярности вектора магнитной индукции плоскости контура произведение изменения площади контура ΔS на модуль вектора магнитной индукции равно модулю изменения магнитного потока через контур:

$$B\Delta S = \Delta\Phi. \qquad (65.4)$$

Подставив формулу (65.4) в формулу (65.3), получим

$$\mathscr{E}_{инд} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \qquad (65.5)$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ ЭДС индукции в контуре равна отношению изменения магнитного потока через контур к малому промежутку времени, за который произошло это изменение, взятому с противоположным знаком.

Полученный результат справедлив для частного случая равномерного движения проводника в однородном магнитном поле. В общем случае для нахождения ЭДС индукции в контуре в любой момент времени нужно найти предел отношения (см. формулу (65.5)) при условии неограниченного уменьшения промежутка времени ($\Delta t \to 0$). При известной зависимости от времени магнитного потока через контур предел этого отношения определяется как производная от магнитного потока по времени:

$$\mathscr{E}_{инд} = \lim_{\Delta t \to 0}\left(-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right) = -\Phi'(t). \qquad (65.6)$$

Выражения (65.5) и (65.6) для ЭДС индукции получены для случая изменения магнитного потока через контур в результате движения проводника в магнитном поле. Однако опыты показали, что они применимы для определения ЭДС индукции и во всех других случаях, при любом изменении магнитного поля. Таким образом, мы получили закон природы, открытый М. Фарадеем и названный *законом электромагнитной индукции* или *законом Фарадея*.

ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ЭДС индукции в контуре равна скорости изменения во времени магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, взятой с противоположным знаком.

ЭДС индукции в катушке. Если в последовательно соединённых контурах происходят одинаковые изменения магнитного потока, то ЭДС индукции в них равна сумме ЭДС индукции в каждом из контуров. Поэтому при изменении магнитного потока в катушке, состоящей из N одинаковых витков провода, возникает ЭДС индукции, в N раз большая, чем в одиночном контуре:

$$\mathscr{E} = -N\Phi'(t).$$



Индукционное электрическое поле. Электромагнитное поле. Закон электромагнитной индукции



1. Что происходит со свободными электрическими зарядами в проводнике, движущемся в магнитном поле? 2. При каком условии прекращается движение

свободных электрических зарядов внутри проводника, который движется в магнитном поле? 3. Какая причина вызывает разделение электрических зарядов в неподвижном проводнике, который находится в изменяющемся магнитном поле? 4. В чём отличие индукционного электрического поля от электростатического? 5. При каких условиях в замкнутом контуре возникает индукционный ток?

ЗАДАЧА. Рассчитайте установившуюся скорость падения перемычки вдоль проволочного каркаса в магнитном поле, линии индукции которого горизонтальны и перпендикулярны плоскости каркаса. Длина перемычки l, её масса m, электрическое сопротивление R. Модуль индукции магнитного поля B.

Решение. При падении перемычки изменяется площадь проволочного контура, следовательно, изменяется пронизывающий его магнитный поток. При этом в контуре возникает ЭДС индукции, модуль которой можно найти, используя формулу (65.2):

$$\mathscr{E} = Blv.$$

В металлической перемычке под действием ЭДС индукции возникает ток. Сила тока определяется по закону Ома:

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R} = \frac{Blv}{R}.$$

По мере увеличения скорости перемычки сила тока возрастает, следовательно, увеличивается сила Ампера, действующая на перемычку и тормозящая её движение:

$$F_A = IBl = \frac{B^2l^2v}{R}.$$

При достижении равенства силы тяжести, действующей на перемычку, и силы Ампера перемычка начинает двигаться с постоянной скоростью, которую легко определить из этого условия: $mg = F_A$, или $mg = \frac{B^2l^2v}{R}$, откуда

$$v = \frac{mgR}{(Bl)^2}.$$

РЕШИТЕ

65.1. Определите ЭДС индукции в контуре при равномерном уменьшении магнитного потока на $4 \cdot 10^{-4}$ Вб за 0,2 с.

65.2. Сколько витков должна иметь катушка, для того чтобы при равномерном возрастании магнитного потока через каждый её виток от нуля до $2 \cdot 10^{-5}$ Вб за $5 \cdot 10^{-3}$ с на её концах возникало напряжение 220 В?

65.3. Какое напряжение возникает между концами крыльев самолёта при его движении в магнитном поле Земли, если расстояние между концами крыльев самолёта 43 м, а скорость полёта 900 км/ч? Модуль вертикальной составляющей вектора магнитной индукции примите равным $2 \cdot 10^{-5}$ Тл.

Опыты Фарадея по электромагнитной индукции.

§ 66. Правило Ленца

Повторите: индукционный ток.



Рис. 7.6

Правило Ленца. При рассмотрении явления электромагнитной индукции мы не обращали особого внимания на направление индукционного тока в контуре. Остановимся теперь на этом вопросе. Опыт показывает, что направление индукционного тока в контуре зависит от того, возрастает или убывает магнитный поток, пронизывающий контур. Общее правило, позволяющее определить направление индукционного тока в контуре, было установлено в 1833 г. российским учёным Э. Х. Ленцем.

Правило Ленца можно наглядно показать с помощью лёгкого алюминиевого кольца. При вдвигании постоянного магнита сплошное кольцо отталкивается от него (рис. 7.6), а при выдвигании притягивается к магниту. Результаты опытов не зависят от полярности магнита. Если же вдвигать (или выдвигать) магнит в кольцо с прорезью, то кольцо остаётся неподвижным, так как в нём не возникает индукционный ток.

Отталкивание и притяжение сплошного кольца объясняется возникновением в нём индукционного тока при изменениях магнитного потока через это кольцо и действием магнитного поля на индукционный ток. При вдвигании магнита магнитный поток через кольцо возрастает, кольцо отталкивается, т. е. индукционный ток в нём имеет такое направление, что вектор индукции его магнитного поля противоположен по направлению вектору индукции внешнего магнитного поля. Этим вызвано отталкивание кольца от магнита. При уменьшении магнитного потока через контур (выдвигание магнита) индукционный ток в нём имеет такое направление, что вектор индукции его магнитного поля совпадает по направлению с вектором индукции внешнего магнитного поля, и этим объясняется притяжение кольца к магниту.

Обобщение результатов опытов приводит к следующему выводу, сформулированному Э. Х. Ленцем.

ПРАВИЛО ЛЕНЦА Индукционный ток имеет всегда такое направление, что его магнитное поле препятствует любым изменениям магнитного потока, вызывающим появление индукционного тока.

Эта особенность явления электромагнитной индукции выражена математически знаком «минус» в формуле, устанавливающей связь ЭДС индукции со скоростью изменения магнитного потока через контур (см. формулу (65.5)).

Правило Ленца является следствием закона сохранения энергии в электромагнитных процессах. Энергия индуцированного электрического тока в контуре может идти на нагревание проводников, превращаться в механическую энергию движущихся механизмов и сопровождаться другими превращениями энергии. Эта энергия не может возникнуть сама собой, а может появиться

лишь за счёт других видов энергии, а именно за счёт работы внешних сил против сил Ампера, возникающих при возбуждении индукционного тока в контуре.

Индукционный ток в сплошных проводниках. Согласно закону электромагнитной индукции любые изменения магнитного потока, пронизывающего проводящее тело, сопровождаются возникновением в нём индукционных токов.

ЗАПОМНИТЕ Индукционные токи в сплошных проводящих телах называются **токами Фуко**.

Их можно обнаружить на опыте с маятником (пластиной), колеблющимся в зазоре электромагнита (рис. 7.7). До включения тока маятник колеблется длительное время без существенного уменьшения размаха колебаний. При пропускании тока через катушку электромагнита маятник быстро останавливается. Торможение маятника объясняется действием магнитного поля на индукционные токи, возникающие в пластине при её движении в магнитном поле. Если же взять пластину с разрезами, то её колебания долго не затухают.

Тормозящее действие индукционных токов используется для успокоения колебаний стрелок электроизмерительных приборов.



Рис. 7.7

Правило Ленца. Токи Фуко

1. Как объяснить результаты опытов с лёгким алюминиевым кольцом и движущимся магнитом? 2. Как формулируется правило Ленца? 3. Какова связь правила Ленца с законом сохранения энергии? 4. Почему колебания металлической сплошной пластины между полюсами электромагнита быстро затухают? 5. Почему колебания пластины с разрезами затухают медленнее, чем колебания сплошной пластины? 6. Почему якорь двигателя постоянного тока набирают из тонких стальных пластин, изолированных друг от друга, а не отливают в виде сплошной болванки, что было бы проще?

Возьмите небольшой магнит и подвесьте его на нити. Закрепите нить в штативе так, чтобы получился маятник. Отклоните маятник на некоторый угол (угол нужно зафиксировать) и установите период колебаний маятника. Затем положите под маятник пластину сначала из меди, а потом из алюминия. Вновь установите период колебаний маятника. Есть ли разница?

Индукционные печи.

§ 67. Самоиндукция

Повторите: сила тока в проводнике.

Индуктивность. Электрический ток, проходящий по проводнику, создаёт вокруг него магнитное поле. Магнитный поток через контур этого проводника пропорционален индукции магнитного поля внутри контура, а индукция магнитного поля пропорциональна силе тока в проводнике. Следовательно, магнитный поток через контур прямо пропорционален силе тока в контуре:

$$\Phi = LI.$$

ЗАПОМНИТЕ Физическая величина, равная отношению магнитного потока через контур к силе тока в контуре, называется **индуктивностью** этого контура:

$$L = \frac{\Phi}{I}.$$

Единица индуктивности. За единицу индуктивности в СИ принимается генри (Гн). Индуктивность контура равна 1 Гн, если при силе постоянного тока 1 А магнитный поток через контур равен 1 Вб:

$$1\ \text{Гн} = \frac{1\ \text{Вб}}{1\ \text{А}}.$$

Индуктивность катушки. Найдём индуктивность длинной цилиндрической катушки. Пусть длина катушки l, радиус одного витка $r \ll l$, число витков N и сила тока в обмотке I. Если в катушке нет сердечника, то индукция магнитного поля $B_0 = \mu_0 NI/l$ (см. формулу (60.3)); при наличии сердечника $B = \mu\mu_0 NI/l$, где μ — магнитная проницаемость вещества, из которого изготовлен сердечник (при условии, что вещество полностью заполняет пространство внутри катушки).

Магнитный поток, создаваемый током через один виток, равен $\Phi_1 = BS$, поток, создаваемый током через N витков, равен $\Phi = NBS$, где $S = \pi r^2$ — площадь поперечного сечения катушки. Подставив значение магнитной индукции, получим

$$\Phi = \frac{\mu\mu_0 N^2 IS}{l}.$$

Отсюда для индуктивности катушки имеем

$$L = \frac{\mu\mu_0 N^2 S}{l} = \mu\mu_0 n^2 Sl, \qquad (67.1)$$

где $n = N/l$ — число витков на единицу длины катушки.

Самоиндукция. При изменении силы тока в катушке происходит изменение магнитного потока, создаваемого этим током. Изменение магнитного потока, пронизывающего катушку, в свою очередь, сопровождается появлением ЭДС индукции в катушке.

ЗАПОМНИТЕ Явление возникновения ЭДС индукции в электрической цепи в результате изменения силы тока в этой же цепи называется **самоиндукцией**.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ В соответствии с правилом Ленца ЭДС самоиндукции препятствует нарастанию силы тока при включении цепи и убыванию силы тока в ней при выключении.

Явление самоиндукции можно наблюдать, собрав электрическую цепь из катушки с большой индуктивностью, переменного резистора, двух одинаковых ламп накаливания и источника тока (рис. 7.8). Резистор должен иметь такое же электрическое сопротивление, что и обмотка катушки. Опыт показывает, что при замыкании цепи электрическая лампа, включённая последовательно с катушкой, загорается несколько позже, чем лампа, включённая последовательно с резистором. Нарастанию тока при замыкании цепи препятствует ЭДС самоиндукции, возникающая при возрастании магнитного потока. При отключении источника тока гаснут обе лампы, но с некоторым запаздыванием. В этом случае ток в цепи поддерживается за счёт ЭДС самоиндукции, возникающей при убывании магнитного потока в катушке.

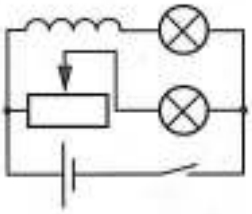


Рис. 7.8

ЭДС самоиндукции. ЭДС самоиндукции $\mathscr{E}_L$, возникающая в катушке с индуктивностью L, по закону электромагнитной индукции равна:

$$\mathscr{E}_L = -\Phi'(t) = -(LI(t))' = -LI'(t). \qquad (67.2)$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна индуктивности катушки и скорости изменения силы тока в её обмотке.

Используя выражение (67.2), можно дать ещё одно определение единицы индуктивности: элемент электрической цепи обладает индуктивностью 1 Гн, если при равномерном изменении силы тока в цепи со скоростью 1 А за 1 с в нём возникает ЭДС самоиндукции 1 В.

Индуктивность. Катушка индуктивности. Самоиндукция. ЭДС самоиндукции

1. Что называется индуктивностью? 2. Как определяется единица индуктивности? 3. Что такое самоиндукция? 4. В каких опытах обнаруживается явление самоиндукции? 5. От чего зависит ЭДС самоиндукции?

РЕШИТЕ

67.1. Какой индуктивностью обладает контур, если при силе тока 20 А магнитный поток в контуре 10^{-2} Вб?

67.2. Какое напряжение возникает между концами катушки с индуктивностью 1 Гн при равномерном убывании силы тока в ней от 1 А до 0 за 10^{-3} с?

67.3. Вычислите индуктивность цилиндрической катушки, имеющей 1000 витков, длину 50 см и диаметр витка 10 см.

Обычно в кинотеатрах перед сеансом свет гасят очень медленно. Придумайте схему, с помощью которой это возможно осуществить.

§ 68. Энергия электромагнитного поля

Повторите: энергия электрического поля, энергия магнитного поля.

Энергия магнитного поля катушки с током. Если включить электрическую лампу параллельно катушке в электрическую цепь постоянного тока, то при размыкании ключа наблюдается кратковременная вспышка лампы. Ток в цепи возникает под действием ЭДС самоиндукции. Источником энергии, выделяющейся при этом в электрической цепи, является магнитное поле катушки.

Энергию магнитного поля катушки можно вычислить следующим способом. Для упрощения расчёта рассмотрим такой случай, когда после отключения катушки от источника сила тока в цепи убывает со временем по линейному закону. При таком условии ЭДС самоиндукции имеет постоянное значение. Это значение определяется выражением $\mathscr{E}_L = -\frac{L\Delta I}{\Delta t} = \frac{LI}{\Delta t}$. Здесь Δt — промежуток времени, в течение которого сила тока в цепи убывает от начального значения I до конечного значения, равного нулю. Итак, ЭДС самоиндукции при линейном законе убывания силы тока равна:

$$\mathscr{E}_L = LI/\Delta t.$$

За время Δt при линейном убывании силы тока по цепи проходит электрический заряд

$$q = I_{ср}\Delta t = \frac{I+0}{2}\Delta t = \frac{I\Delta t}{2},$$

поэтому работа электрического тока, совершаемая за счёт энергии магнитного поля, равна:

$$A = q\mathscr{E}_L = \frac{I\Delta t LI}{2\Delta t} = \frac{LI^2}{2}.$$

Отсюда следует, что энергия магнитного поля в катушке

$$W_м = LI^2/2. \qquad (68.1)$$

Плотность энергии магнитного поля. Полученное выражение попробуем обобщить. Если считать катушку очень длинной (бесконечно длинной в пределе), то всё магнитное поле окажется сосредоточенным внутри катушки. Подставив в выражение (68.1) значение индуктивности длинной катушки $L = \mu\mu_0 n^2 Sl$ (см. формулу (67.1)) и значение индукции магнитного поля в этой катушке $B = \mu\mu_0 In$ (см. формулу (60.3)), получим

$$W_м = \frac{1}{2}\mu\mu_0 n^2 SlI^2 = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}Sl.$$

Но $V = Sl$ есть объём катушки. Таким образом, мы можем утверждать, что энергия магнитного поля рассредоточена по всему объёму катушки, а плотность энергии магнитного поля

$$w_м = \frac{W_м}{V} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}.$$

Дж. Максвелл показал, что это выражение, полученное нами для частного случая длинной катушки, справедливо для любых магнитных полей.

Плотность энергии электромагнитного поля. В § 52 мы показали, что электрическое поле обладает энергией. Для плоского конденсатора мы получили выражение

$$W_э = \frac{CU^2}{2},$$

а для плотности энергии электрического поля — выражение

$$w_э = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}.$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ В общем случае плотность энергии электромагнитного поля равна:

$$w = w_э + w_м = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu\mu_0}.$$

Заметим, что при переходе из одной инерциальной системы отсчёта в другую напряжённость $\vec{E}$ и индукция $\vec{B}$ будут меняться. Более того, в некоторых случаях один из этих векторов может оказаться равным нулю. Но энергия электромагнитного поля не исчезает, она сохраняется во всех системах отсчёта.

Энергия электромагнитного поля. Плотность энергии электромагнитного поля

ЗАДАЧА. Два одинаковых конденсатора, электроёмкость каждого из которых равна C, и катушка индуктивностью L соединены так, как показано на рисунке 7.9. В начальный момент времени ключи разомкнуты, конденсатор $C1$ заряжен до напряжения U, а конденсатор $C2$ не заряжен. Чему равна максимальная сила тока в катушке после замыкания ключей?

Решение. После замыкания ключа $K1$ заряд конденсатора $C1$ перераспределяется между конденсаторами $C1$ и $C2$ до равенства их напряжений:

$$\begin{cases} q = q_1 + q_2, \\ U_1 = U_2, \end{cases} \text{ или } \begin{cases} q = q_1 + q_2, \\ \dfrac{q_1}{C} = \dfrac{q_2}{C}. \end{cases}$$

Отсюда

$$q_1 = q_2 = \frac{q}{2},\ U_1 = U_2 = \frac{U}{2}.$$

Следовательно, энергия обоих конденсаторов после замыкания ключа равна:

$$W_2 = \frac{CU_1^2}{2} + \frac{CU_2^2}{2} = \frac{C}{2}\left(\frac{U^2}{4} + \frac{U^2}{4}\right) = \frac{CU^2}{4}.$$

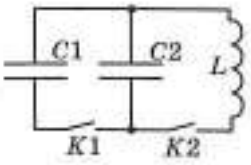


Рис. 7.9

Сравнивая эту энергию с энергией одного конденсатора до замыкания ключа

$$W_1 = \frac{CU^2}{2},$$

мы видим, что половина энергии конденсатора как бы исчезла, но это противоречит закону сохранения энергии. На самом деле энергия не исчезла — она израсходовалась на образование искры в момент контакта электродов ключа и на нагрев соединительных проводов, т. е. превратилась в конечном счёте во внутреннюю энергию окружающей среды. Замкнём ключ $K2$.

В тот момент, когда вся энергия электрического поля конденсаторов превращается в энергию магнитного поля катушки, на основании закона сохранения энергии выполняется равенство

$$\frac{CU^2}{4} = \frac{LI_{max}^2}{2},$$

откуда

$$I = U\sqrt{\frac{C}{2L}}.$$

РЕШИТЕ

68.1. В обмотке катушки индуктивностью 5,2 мГн сила тока 20 А. Определите энергию магнитного поля катушки и плотность энергии; объём катушки 200 см^3.

68.2. Конденсатор электроёмкостью 600 мкФ заряжен до напряжения 300 В. Его замыкают на катушку индуктивностью 25 мГн. Определите максимальную силу тока в катушке.

68.3. Магнитный поток через катушку равен 1 Вб, а энергия магнитного поля катушки равна 6 Дж. Определите силу постоянного тока, идущего в катушке.

68.4. Сила постоянного тока, идущего по витку радиусом 8 см, равна 5 А. Виток помещают в магнитное поле индукцией 0,1 Тл, так, что его плоскость перпендикулярна линиям магнитной индукции поля. Определите работу, которую нужно совершить, чтобы повернуть виток на 90° вокруг оси, совпадающей с его диаметром и перпендикулярной линиям индукции поля.

§ 69*. Электрический генератор постоянного тока

Повторите: постоянный электрический ток, правило Ленца.

Превращение механической энергии в электрическую. Явление электромагнитной индукции используется в электрических генераторах постоянного тока. При движении проводника длиной l в магнитном поле перпендикулярно вектору индукции $\vec{B}$ в нём под действием ЭДС индукции создаётся индукционный электрический ток, сила тока которого I. На проводник с током действует сила Ампера $F_A = IBl$. Применив правило левой руки, можно убедиться, что направление силы Ампера противоположно направлению скорости движения проводника $\vec{v}$ (рис. 7.10), что соответствует правилу Ленца. Следовательно, для равномерного движения проводника к нему должна быть приложена сила $\vec{F}$, равная по модулю силе Ампера $\vec{F}_A$, но направленная в противоположную сторону: $\vec{F} = -\vec{F}_A$. Эта сила при перемещении проводника на расстояние $\Delta x = v\Delta t$ совершает работу:

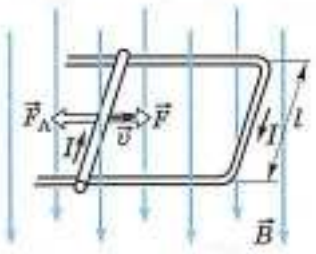


Рис. 7.10

$$A = F\Delta x = IBlv\Delta t = \frac{q}{\Delta t}Blv\Delta t = q\mathcal{E}_{инд}.$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Работа внешних сил, вызывающих движение проводника в магнитном поле, равна работе ЭДС индукции в электрической цепи. Магнитное поле является причиной разделения электрических зарядов в движущемся проводнике, но не является источником энергии электрического тока.

Вектор магнитной силы, действующей на движущиеся электрические заряды, перпендикулярен вектору скорости заряда, поэтому работа магнитных сил всегда равна нулю.

Более полный ответ на вопрос о роли силы Лоренца и внешних сил в возникновении ЭДС индукции получим на основании рассмотрения рисунка 7.11.

При равномерном движении проводника AB в магнитном поле в нём возникает индукционный электрический ток. За время Δt, необходимое для перемещения зарядов на расстояние l от конца A к концу B, проводник перемещается на расстояние $\Delta x = v\Delta t$. В результате свободные электрические заряды за время Δt перемещаются из точки A в точку B' со скоростью $u = v/\cos\alpha$.

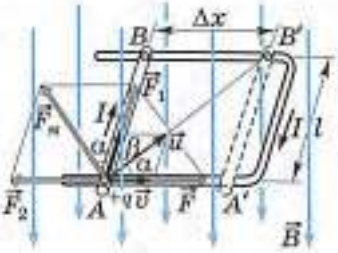


Рис. 7.11

Вектор $\vec{F}_л$ силы Лоренца, действующей на положительный электрический заряд q, направлен перпендикулярно вектору $\vec{B}$ магнитной индукции и вектору $\vec{u}$ скорости заряда. Модуль силы Лоренца равен:

$$F_л = quB = \frac{qvB}{\cos\alpha}.$$

Если проводник AB движется равномерно со скоростью $\vec{v}$, то это значит, что равнодействующая $\vec{F}_1$ силы Лоренца $\vec{F}_л$ и внешней силы $\vec{F}$ направлена вдоль проводника AB. Модуль равнодействующей $F_1 = F_л \cos\alpha$.

Найдём работу силы $\vec{F}_1$ при перемещении заряда q от точки A до точки B в движущемся проводнике. Эта работа равна:

$$A = F_1 l = F_л l \cos\alpha = \frac{qvBl\cos\alpha}{\cos\alpha} = qvBl.$$

Так как $|\mathscr{E}_{инд}| = vBl$ (см. формулу (65.2)), то эта работа равна:

$$A = q\mathscr{E}_{инд}.$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Вектор силы Лоренца $\vec{F}_л$ перпендикулярен вектору скорости $\vec{u}$ движения электрических зарядов, но вектор равнодействующей $\vec{F}_1 = \vec{F}_л + \vec{F}$ направлен под углом $\beta = 90° - \alpha$ к вектору скорости $\vec{u}$. Работа равнодействующей служит источником ЭДС индукции. Фактически же работу совершает только внешняя сила $\vec{F}$.

На эту картину можно посмотреть иначе. Разложим вектор $\vec{F}_л$ силы Лоренца на две составляющие — $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, направленные вдоль проводника AB и перпендикулярно к нему. Так как проводник движется равномерно, то составляющая $\vec{F}_2$ равна по модулю внешней силе $\vec{F}$ и направлена противоположно: $\vec{F}_2 = -\vec{F}$.

Суммарная работа этих двух сил равна нулю. Следовательно, полная работа всех сил, действующих на электрические заряды в проводнике, равна работе составляющей $\vec{F}_1$ силы Лоренца. Работа этой силы отлична от нуля, хотя работа силы Лоренца $\vec{F}_л$ равна нулю.

Машина постоянного тока как электрический генератор. На явлении возникновения ЭДС индукции в рамке при вращении её в однородном магнитном поле основан принцип действия машины постоянного тока как генератора. Как и двигатель, генератор состоит из двух основных частей — индуктора и якоря, обмотка которого через коллектор и щётки соединяется с внешней цепью.

При пропускании постоянного тока через обмотки индуктора между его полюсными наконечниками создаётся магнитное поле. В магнитном поле индуктора вращается якорь. Якорь имеет сердечник цилиндрической формы, набранный из изолированных листов стали. Концы обмоток якоря присоединены к пластинам коллектора.

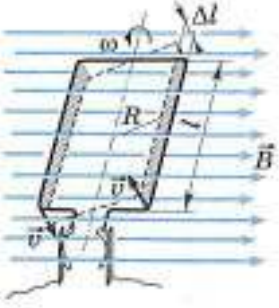


Рис. 7.12

При вращении якоря в магнитном поле индуктора в его обмотке возникает ЭДС индукции. Через скользящие контакты коллектора с внешней электрической цепью соединяются выводы от той обмотки, плоскость которой в данный момент времени расположена параллельно вектору индукции магнитного поля (рис. 7.12).

Модуль ЭДС индукции в одном витке вращающегося якоря равен:

$$\mathscr{E} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{B\Delta S}{\Delta t}. \qquad (69.1)$$

Изменение площади контура, пронизываемого магнитным потоком перпендикулярно вектору магнитной индукции, равно:

$$\Delta S = 2l\Delta l. \qquad (69.2)$$

При малых значениях угла поворота витка отрезок Δl примерно равен длине дуги радиусом R:

$$\Delta l \approx v\Delta t = \frac{2\pi R}{T}\Delta t = 2\pi R\nu\Delta t, \qquad (69.3)$$

где v — скорость движения проводника, T и ν — соответственно период и частота вращения якоря.

Подставив выражения (69.2) и (69.3) в формулу (63.1), получим

$$\mathscr{E} = 4\pi BRl\nu.$$

Если же обмотка содержит N витков, то $\mathscr{E} = 4\pi NBRl\nu$.

Учитывая, что $S = 2Rl$ есть площадь рамки, а $\Phi_{max} = BS = 2BRl$ есть максимальный магнитный поток, пронизывающий рамку, получим ещё одно важное выражение для ЭДС генератора постоянного тока:

$$\mathscr{E} = 2\pi N\Phi_{max}\nu.$$

В генераторе постоянного тока питание обмоток индуктора может производиться током, который вырабатывает сам генератор.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Генератор постоянного тока с самовозбуждением часто называют *динамо-машиной*.

Обмотку индуктора можно присоединять либо параллельно, либо последовательно с якорем. В динамо-машине, как правило, применяется параллельное соединение индуктора с внешней цепью. В этом случае ЭДС мало зависит от сопротивления внешней нагрузки, а её значение можно легко регулировать, изменяя реостатом силу тока в обмотке индуктора и тем самым индукцию магнитного поля. Постоянство скорости вращения якоря обеспечивается первичным двигателем, приводящим якорь во вращение.

Превращение механической энергии в электрическую. Электрический генератор постоянного тока

1. Каким образом в генераторе постоянного тока происходит превращение механической энергии в электрическую? 2. Каков принцип действия машинного генератора постоянного тока? 3. От чего зависит напряжение на выходе генератора постоянного тока? 4. Каким образом машина постоянного тока может быть использована в качестве электродвигателя? 5. В чём сущность обратимости электрических машин постоянного тока? Как это согласуется с законом сохранения энергии?

РЕШИТЕ 69.1. Якорь генератора постоянного тока вращается с частотой 20 об/с. Чему равно напряжение на выходе генератора, если радиус якоря 8 см, а число витков в обмотке 20? Длина стороны рамки 25 см, индукция поля 0,6 Тл.

69.2. Максимальный магнитный поток, пронизывающий обмотку якоря, равен $8{,}0 \cdot 10^{-3}$ Вб. Якорь совершает 50 об/с. Сколько витков должна содержать одна секция обмотки якоря, чтобы возникла ЭДС, равная 65 В?

§ 70. Магнитная запись информации

Повторите: информация, ферромагнетики.

Проблема записи и воспроизведения звука. Наиболее привычный для каждого человека способ обмена информацией — это речь. При обмене информацией с помощью речи один человек возбуждает звуковые колебания в воздухе с помощью голосовых связок, другой воспринимает эти колебания с помощью органов слуха.

Недостатком такого способа обмена информацией является возможность её передачи только на сравнительно небольшие расстояния и невозможность сохранения и воспроизведения в любое время.

Способ механической записи и воспроизведения звука придумал американский изобретатель Т. Эдисон. Однако механический способ не обеспечивает высокого качества звучания.

Микрофон и громкоговоритель. Первыми шагами к созданию современных способов записи и воспроизведения звука было изобретение микрофона и громкоговорителя.

ЗАПОМНИТЕ **Микрофоном** называется прибор для преобразования звуковых механических колебаний в электрические.

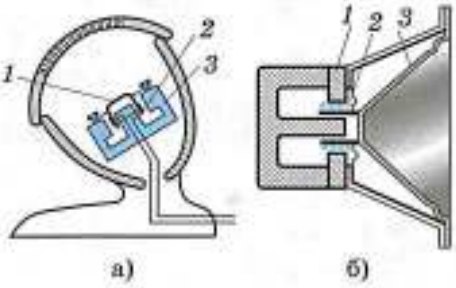


Рис. 7.13

Изменения давления, происходящие при распространении звуковых волн в воздухе, позволяют использовать для их регистрации и изучения микрофоны различных конструкций.

В *электродинамическом микрофоне* имеется тонкая гибкая мембрана *1*, к которой приклеена лёгкая проволочная катушка *2*. Катушка расположена в кольцевом зазоре между полюсами постоянного магнита *3* (рис. 7.13, *а*). Колебания давления воздуха, возникающие при прохождении звуковой волны, вызывают колебания мембраны микрофона и соединённой с ней проволочной катушки. Колебания катушки в магнитном поле постоянного магнита приводят к возникновению в ней переменной ЭДС индукции. Таким образом в электродинамическом микрофоне происходит преобразование звуковых колебаний в электрические.

ЗАПОМНИТЕ Для обратного преобразования электрических колебаний в механические звуковые колебания применяется прибор, называемый **громкоговорителем**.

Основными частями *электродинамического громкоговорителя* (динамика) являются кольцевой постоянный магнит *1*, проволочная катушка *2* и диффузор *3*, к которому прикреплена катушка (рис. 7.13, *б*). При пропускании через

катушку 2 переменного тока звуковой частоты на неё действует со стороны магнитного поля переменная сила Ампера. Под действием этой силы катушка вместе с диффузором совершает колебания, что вызывает изменения давления воздуха, т. е. возбуждает звуковые волны.

Магнитная запись и воспроизведение звука. Одним из наиболее распространённых способов сохранения и последующего воспроизведения звуков — речи и музыки — долгое время являлась магнитная запись. Она была основана на свойстве ферромагнетиков сохранять остаточное намагничивание после снятия внешнего магнитного поля.

ИНТЕРЕСНО Способ сохранения информации с использованием магнитного поля был предложен ещё в 1898 г. — это точка отсчёта в развитии магнитной памяти. Его автором был датский инженер В. Поулсен, работавший в Копенгагенской телефонной компании. Идея В. Поулсена заключалась в следующем. Поулсен перемещался от одного конца проволоки к другому, говоря в микрофон, присоединённый к электромагнитной катушке, движущейся по струне с помощью тележки (рис. 7.14, *а*). Затем он возвращал тележку в исходное положение и заменял микрофон динамиком. При этом в процессе движения тележки с динамиком можно было слышать записанный голос.

Этот принцип лежит в основе более поздних устройств магнитной записи информации с той лишь разницей, что струна заменена тонкой плёнкой с магнитным слоем (рис. 7.14, *б*).

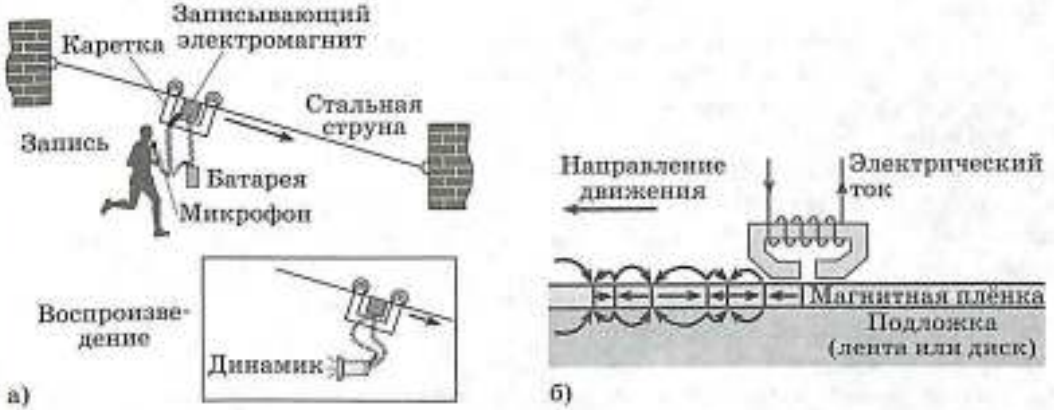


Рис. 7.14

В магнитофонах запись звука производилась на тонкую пластмассовую ленту, покрытую слоем порошка ферромагнитного материала. Колебания воздуха в звуковой волне преобразовывались с помощью микрофона *М* в колебания силы тока в электрической цепи (рис. 7.15). После усиления этих колебаний с помощью усилителя *УЗ* переменный ток звуковой частоты поступал в обмотку кольцевого электромагнита головки записи *ГЗ*. При протягивании

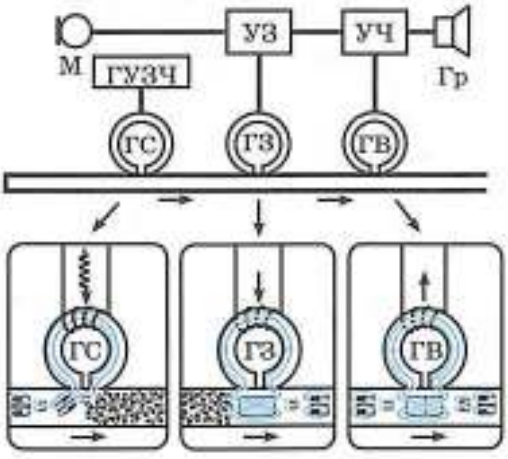


Рис. 7.15

магнитной ленты около зазора между полюсами кольцевого электромагнита различные участки ленты намагничивались в соответствии с изменениями силы тока в обмотке. Полоса на ленте, намагниченная в процессе записи, называлась *дорожкой записи*.

Для воспроизведения записи магнитная лента протягивалась перед зазором кольцевого электромагнита головки воспроизведения *ГВ* с той же скоростью, с которой она протягивалась при записи.

При движении намагниченной ленты происходили изменения магнитного поля в зазоре головки воспроизведения и в её обмотке возникала переменная ЭДС индукции.

Переменное напряжение с выхода обмотки головки воспроизведения усиливалось с помощью усилителя воспроизведения *УВ*. Усиленное напряжение звуковой частоты подводилось к катушке громкоговорителя *ГР*. Переменный ток в катушке громкоговорителя вызывал колебания катушки в магнитном поле постоянного магнита. Прикреплённый к катушке диффузор воспроизводил звук.

Для стирания ненужной записи с ленты служила магнитная головка стирания записи *ГС*, к обмотке которой подводилось переменное напряжение от генератора ультразвуковой частоты *ГУЗЧ*.

В бытовых магнитофонах при записи и воспроизведении обычно использовались одна и та же универсальная головка и один усилитель.

Видеозапись. На магнитную ленту мог быть записан не только сигнал звуковой частоты, но и сигнал для управления электронным пучком кинескопа телевизора.

На магнитную ленту видеомагнитофона записывалась информация об изображении и звуковом сопровождении.

При считывании записи с ленты с помощью магнитных головок на экране телевизора получалось изображение и динамик воспроизводил звуковое сопровождение изображения.

Несмотря на то что плёночные магнитофоны уже практически не используются, тем не менее такой принцип записи информации ещё используют некоторые фирмы, выпускающие персональные компьютеры, для создания магнитооптических дисков, выполняющих чаще всего функцию жёсткого диска.

Магнитная память ЭВМ. Для работы ЭВМ необходим обмен информацией с внешними устройствами.

Так как вся информация для компьютера представляет собой набор сигналов типа «да» или «нет», эта информация может быть записана на магнит-

ный диск (англ. *hard disk drive*) в виде чередующихся участков с различной полярностью намагничивания.

Тем самым информация записывается в двоичном коде, где «единица» характеризуется намагниченным участком, а «нуль» — ненамагниченным (или наоборот).



Рис. 7.16

В персональных компьютерах для записи информации используют жёсткие диски (алюминиевые или стеклянные), покрытые слоем ферромагнитного материала, чаще всего двуокиси хрома. Запись и считывание производятся с помощью специальной головки, перемещающейся над поверхностью диска вдоль его радиуса (рис. 7.16). Расстояние между головкой и диском составляет несколько нанометров. Диск вращается со скоростями от 4500 (ноутбуки) до 15 000 об/мин (серверы и воспроизводительные рабочие станции), запись производится на концентрических дорожках. Полная ёмкость записи информации на диске в настоящее время приближается к 5 Тб.

Магнитная запись информации. Магнитная память ЭВМ

1. Каков принцип действия микрофона? 2. Как работает громкоговоритель? 3. Как осуществлялась магнитная запись звука? 4. Как осуществлялось воспроизведение магнитной звукозаписи? 5. Как устроена магнитная память компьютера?

Опыт Поулсена.

ОТВЕТЬТЕ НА ИТОГОВЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ

1. Опишите опыты М. Фарадея и способы получения в них индукционного тока.
2. Дайте определение электромагнитного поля.
3. Сформулируйте закон электромагнитной индукции.
4. Опишите токи Фуко: особенности возникновения, следствия существования, способы борьбы с ними.
5. Дайте определения энергии электромагнитного поля и плотности энергии.

1. Ускорители заряженных частиц. История создания, устройство и применение. Линейные и циклические ускорители. Бетатрон, циклотрон, фазотрон, синхротрон и синхрофазотрон. Линейные и кольцевые коллайдеры. Большой адронный коллайдер.
2. Полярные сияния.
3. Способы увеличения плотности информации при её магнитной записи.

ЕГЭ

А1. Поток вектора магнитной индукции, равной 0,05 Тл, через рамку, площадь которой равна 0,02 м^2, а плоскость расположена под углом 60° к вектору B, равен

1) 0,87 мВб 2) 0,5 мВб 3) 0,25 мВб 4) 2,2 мВб

А2. За 5 с магнитный поток, пронизывающий проволочную рамку, увеличился от 3 до 8 Вб. Чему равно при этом значение ЭДС индукции в рамке?

1) 0,6 В 2) 1 В 3) 1,6 В 4) 25 В

А3. Квадратная рамка, согнутая из тонкого провода длиной l, находится в однородном магнитном поле, индукция которого увеличивается за время t по линейному закону от нуля до некоторого максимального значения. Вектор магнитной индукции поля перпендикулярен плоскости рамки. Как изменится ЭДС индукции, возникающая в рамке, если увеличить длину провода, из которого согнута рамка, в 2 раза?

1) не изменится
2) увеличится в 4 раза
3) уменьшится в 4 раза
4) увеличится в 2 раза

А4. Как изменится энергия магнитного поля катушки, если увеличить индуктивность катушки в 4 раза, а силу тока в ней уменьшить в 2 раза?

1) не изменится
2) увеличится в 6 раз
3) уменьшится в 4 раза
4) увеличится в 2 раза

С5. Кольцо из медной проволоки помещено в однородное магнитное поле так, что его плоскость перпендикулярна вектору магнитной индукции поля. Диаметр кольца 200 мм, диаметр проволоки 2 мм, удельное сопротивление меди $1{,}72 \cdot 10^{-8}$ Ом · м. Определите модуль скорости изменения магнитной индукции поля со временем, если при этом сила индукционного тока, возникающего в кольце, равна 10 А.

Глава 8. Электрический ток в различных средах

§ 71. Электрический ток в металлах

Повторите: диффузия, электрическое поле, носители заряда, электрический ток.

Природа электрического тока в металлах. Электрический ток в металлических проводниках никаких изменений в этих проводниках, кроме их нагревания, не вызывает. Это было подтверждено опытами немецкого физика Э. Рикке (1901). В этих опытах электрический ток пропускали в течение года через три прижатых друг к другу, хорошо отшлифованных цилиндра — медный, алюминиевый и снова медный (рис. 8.1). Общий заряд, прошедший за это время через цилиндры, был очень велик (около $3{,}5 \cdot 10^6$ Кл). После окончания опытов было установлено, что имеются лишь незначительные следы взаимного проникновения металлов, которые не превышают результатов обычной диффузии атомов в твёрдых телах. Измерения, проведённые с высокой степенью точности, показали, что масса каждого из цилиндров осталась неизменной. Поскольку массы атомов меди и алюминия существенно отличаются друг от друга, то масса цилиндров должна была бы заметно измениться, если бы носителями заряда были ионы.

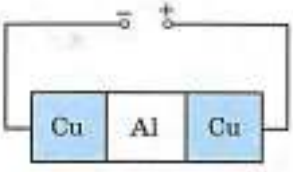


Рис. 8.1

Следовательно, свободными носителями заряда в металлах являются не ионы. Огромный заряд, который прошёл через цилиндры, был перенесён, очевидно, такими частицами, которые одинаковы и в меди, и в алюминии. Как известно, такие частицы входят в состав атомов всех веществ — это электроны. Естественно предположить, что ток в металлах осуществляют именно свободные электроны.


Л. И. Мандельштам

Прямое и убедительное доказательство справедливости этого предположения было получено в опытах, поставленных в 1913 г. русскими физиками Л. И. Мандельштамом (1879—1944) и Н. Д. Папалекси (1880—1947) и в 1916 г. английскими физиками Р. Толменом и Т. Стюартом.



Н. Д. Папалекси

В основе этих опытов лежит предположение о том, что в металлах имеются свободные электроны, оторвавшиеся от атомов. Эти свободные электроны движутся в пространстве между ионами кристаллической решётки.

Если металлический проводник привести в движение и резко затормозить, то свободные электроны должны по инерции продолжать движение относительно ионной решётки. Следовательно, в проводнике должен возникнуть кратковременный ток. Кратковременное движение электронов в проводнике в этом случае подобно отклонению пассажиров автобуса по направлению его движения при резком торможении автобуса.



Рис. 8.2

Опыт по обнаружению инерционного движения электронов в металле был поставлен следующим образом. На катушку наматывают проволоку, концы которой припаивают к двум металлическим дискам, изолированным друг от друга (рис. 8.2). Диски при помощи скользящих контактов соединяются с чувствительным гальванометром. Катушку приводят в быстрое вращение, а затем резко останавливают. Стрелка гальванометра при торможении катушки отклоняется, что говорит о возникновении кратковременного тока.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ По направлению отклонения стрелки было установлено, что ток создаётся движением именно *отрицательно* заряженных частиц.

На основании измерения количества электричества, прошедшего через гальванометр, данных, относящихся к проводнику, намотанному на катушку, и скорости движения катушки до торможения удалось вычислить отношение заряда частиц, создавших ток, к их массе (q_0/m).

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Измерения для отношения модуля заряда электрона к его массе дали следующее значение:

$$\frac{e}{m} = 1{,}8 \cdot 10^{11}\ \text{Кл/кг}.$$



Рис. 8.3

Концентрация электронов проводимости в металле (т. е. их число в единице объёма) очень велика: по порядку величины она равна числу атомов в единице объёма металла. Этим объясняется хорошая электропроводность металлов.

Электроны в металлах находятся в непрерывном движении. Их беспорядочное движение (рис. 8.3) напоминает движение молекул идеального газа. Это дало основание считать, что электроны в металлах образуют своеобразный электронный газ. Но скорость беспоря-

дочного движения электронов в металле значительно больше скорости молекул в газе (она составляет примерно 10^5 м/с).

Когда в металле создаётся электрическое поле, оно действует на электроны с некоторой силой и сообщает им ускорение.

Сталкиваясь с ионами, колеблющимися в узлах кристаллической решётки, электроны отдают им свою энергию. А увеличение энергии ионов означает повышение температуры проводника. Вот почему при прохождении тока проводники нагреваются.

Средняя скорость движения электронов под действием поля (скорость дрейфа). Выразим силу тока I в проводнике через заряд e электрона, концентрацию n электронов проводимости, площадь S поперечного сечения проводника и среднюю скорость $\bar{v}$ упорядоченного движения электронов:

$$I = q_0 n S \bar{v}, \text{ или } I = enS\bar{v}. \qquad (71.1)$$

Используя формулу (71.1), рассчитаем среднюю скорость упорядоченного движения электронов, например, в медном проводнике с площадью поперечного сечения 1 мм^2 при силе тока 10 А.

У большинства металлов концентрация электронов проводимости примерно равна концентрации атомов и находится в пределах 10^{28}—10^{29} м$^{-3}$. В частности, для меди $n = 9 \cdot 10^{28}$ м$^{-3}$. Поэтому для меди получаем

$$\bar{v} = \frac{I}{enS} = \frac{10\ \text{А}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Кл} \cdot 9 \cdot 10^{28}\ \text{м}^{-3} \cdot 10^{-6}\ \text{м}^2} \approx 7 \cdot 10^{-4}\ \frac{\text{м}}{\text{с}} \approx 0{,}7\ \frac{\text{мм}}{\text{с}}.$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Скорость упорядоченного переноса (дрейфа) электронов очень мала. Она в сотни миллионов раз меньше средней скорости теплового движения электронов. При такой скорости для перемещения электрона всего лишь на 5 м понадобилось бы время, равное примерно 2 ч.

Между тем хорошо известно, что, как только мы повернём выключатель, лампа, находящаяся в нескольких десятках метров от него, загорается сразу же. Вообще при замыкании электрической цепи все приборы, на каком бы расстоянии они ни находились друг от друга, начинают действовать практически одновременно. Отсюда следует, что скорость распространения тока и скорость упорядоченного перемещения носителей тока — это не одно и то же.

Скорость распространения тока в проводниках. Когда говорят об огромной скорости распространения тока в проводниках, то имеют в виду, что с такой скоростью распространяется действие электрического поля на заряды в проводнике. Оно вовлекает в упорядоченное движение почти мгновенно все свободные электроны, находящиеся в различных точках проводника, даже очень удалённых друг от друга.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Электрическое поле распространяется со скоростью 300 000 км/с, т. е. со скоростью света. Эту скорость и имеют в виду, когда говорят о скорости распространения тока.

В то же время электроны в проводнике, в любой его точке, перемещаются под действием поля с очень малой скоростью, измеряемой долями миллиметра в секунду.

Электрический ток в металлах. Скорость дрейфа

1. Как движутся электроны проводимости в металлическом проводнике: а) когда в нём нет электрического поля; б) когда в нём создано электрическое поле?
2. Почему при малой скорости упорядоченного движения электронов в металлическом проводнике приборы, включённые в одну и ту же цепь и расположенные на больших расстояниях друг от друга, начинают действовать одновременно?

ЗАДАЧА. Сила постоянного тока, идущего по проводнику, равна 1 А. Определите массу электронов, проходящих через поперечное сечение проводника за время $t = 1$ с.

Решение. Масса электронов, проходящих через поперечное сечение за время $t = 1$ с, равна:

$$m = m_e n S \bar{v} t,$$

где m_e — масса электрона; n — концентрация электронов; S — площадь поперечного сечения проводника; $\bar{v}$ — скорость упорядоченного движения электронов.

Сила тока

$$I = enS\bar{v},$$

где e — модуль заряда электрона. Отсюда

$$nS\bar{v} = \frac{I}{e}.$$

Тогда

$$\frac{m}{t} = m_e \frac{I}{e} \approx 5{,}7 \cdot 10^{-12} \text{ кг}.$$

РЕШИТЕ

71.1. На какое расстояние переместятся электроны по медному проводнику с площадью поперечного сечения 4 мм^2 при силе тока 10 А за 5 с? На какое расстояние распространился бы ток за это время?

71.2. Сила тока в проводнике, площадь поперечного сечения которого 0,2 мм^2, равна 1 А. Концентрация свободных электронов в проводнике равна $5 \cdot 10^{28}$ м$^{-3}$. Определите среднюю скорость упорядоченного перемещения электронов в этом проводнике.

Предложите механический аналог, который можно считать моделью опыта Толмена и Стюарта. Проведите сравнение опытов Мандельштама и Папалекси с опытами Толмена и Стюарта.

§ 72. Зависимость сопротивления металлов от температуры. Сверхпроводимость

Повторите: сопротивление металлов.

Зависимость сопротивления проводников от температуры. Сопротивление металлов связано с тем, что электроны, движущиеся в проводнике, взаимодействуют с ионами кристаллической решётки и теряют при этом часть энергии, которую они приобретают в электрическом поле.

Из физических величин, которыми определяется удельное сопротивление металла $\left(\rho = \frac{2m}{e^2 n\tau}\right)$, масса и заряд электрона — универсальные постоянные. Концентрация n электронов проводимости в металлах практически не зависит от внешних условий, в частности от температуры. Время же свободного пробега τ и, следовательно, число соударений электронов с ионами решётки зависит от температуры. Поэтому следует ожидать, что удельное сопротивление металлов должно зависеть от температуры.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Опыт показывает, что сопротивление металлов действительно зависит от температуры.

В этом легко убедиться. Включим в цепь, содержащую батарею аккумуляторов, стальную спираль (рис. 8.4). Последовательно с ней включим лампу, по свечению которой можно судить об изменении силы тока в цепи.



Рис. 8.4

Нагревая спираль при помощи горелки, мы увидим, что яркость лампочки уменьшилась, следовательно, ток в цепи уменьшился. Значит, при нагревании стального проводника его сопротивление увеличивается. Заменяя стальную спираль другими металлическими проводниками, можно убедиться в том, что при повышении температуры сопротивление всех металлов увеличивается приблизительно пропорционально их абсолютной температуре.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Зависимость удельного сопротивления металлического проводника от температуры выражается линейной функцией

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T). \qquad (72.1)$$

Графически зависимость (72.1) представлена на рисунке 8.5.

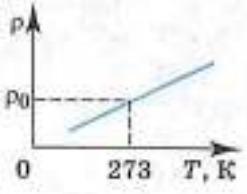


Рис. 8.5

Каждое вещество можно характеризовать постоянной для него величиной, называемой *температурным коэффициентом сопротивления* α.

ЗАПОМНИТЕ **Температурный коэффициент сопротивления** равен относительному изменению удельного сопротивления проводника при его нагревании на 1 К:

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 \Delta T},$$

где ρ_0 — удельное сопротивление при температуре $T_0 = 273$ К (0 °С); ρ — удельное сопротивление при данной температуре T, $\Delta T = T - 273$ К.

Зависимость сопротивления от температуры выражается такой же функцией

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta T).$$

Температурные коэффициенты сопротивления чистых металлов сравнительно мало отличаются друг от друга и примерно равны 0,004 $К^{-1}$. Температурные коэффициенты сопротивления сплавов, как правило, значительно меньше, чем у чистых металлов. Существуют специальные сплавы, сопротивление которых практически не изменяется при нагревании. Таковы, например, сплавы константан и манганин. У манганина $\alpha = 0{,}00001$ $К^{-1}$, у константана $\alpha = 0{,}00005$ $К^{-1}$. Проводники из этих сплавов применяются при изготовлении точных измерительных приборов, а также эталонов сопротивления.

Изменение сопротивления проводников при изменении температуры приводит к тому, что их вольт-амперная характеристика нелинейна. Это особенно заметно в тех случаях, когда температура проводников значительно изменяется, например при работе лампы накаливания. На рисунке 8.6 приведена её вольт-амперная характеристика. Как видно из рисунка, сила тока в этом случае не прямо пропорциональна напряжению. Не следует, однако, думать, что этот вывод противоречит закону Ома. Напомним, что зависимость, сформулированная в законе Ома, справедлива только при постоянном сопротивлении.

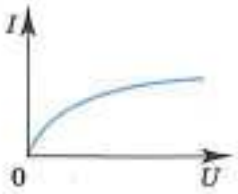


Рис. 8.6

ИНТЕРЕСНО Зависимость сопротивления металлических проводников от температуры используют в различных измерительных и автоматических устройствах. Наиболее важным из них является *термометр сопротивления*.

Основной частью термометра сопротивления служит платиновая проволока, намотанная на керамический каркас (рис. 8.7). Проволоку помещают в среду, температуру которой нужно определить. Измеряя сопротивление этой проволоки и зная её сопротивление при $t_0 = 0$ °С (т. е. R_0), рассчитывают температуру среды.

Термометры сопротивления обладают тем преимуществом, что ими можно пользоваться как при очень низких, так и при весьма высоких температурах, при которых применение обычных, жид-


Рис. 8.7

костных термометров невозможно. Чувствительные термометры сопротивления позволяют измерять температуру с точностью до тысячных долей градуса.

Сверхпроводимость. Как было выяснено, сопротивление металлических проводников уменьшается при понижении температуры. Однако до конца XIX в. нельзя было проверить, как зависит сопротивление проводников от температуры в области очень низких температур. Только в начале XX в. голландскому учёному Г. Камерлинг-Оннесу удалось превратить в жидкое состояние наиболее трудно конденсируемый газ — гелий. Температура кипения жидкого гелия равна 4,2 К. Это и дало возможность измерить сопротивление некоторых чистых металлов при их охлаждении до очень низкой температуры.

В 1911 г. работа Камерлинг-Оннеса завершилась крупнейшим открытием. Исследуя сопротивление ртути при её охлаждении, он обнаружил, что при температуре 4,15 К сопротивление ртути скачком падало до нуля (рис. 8.8). В дальнейшем ему удалось это же явление наблюдать и у ряда других металлов при их охлаждении до температур, близких к абсолютному нулю. Оказалось, что при некоторой характерной для каждого из них температуре сопротивление падало до нуля.

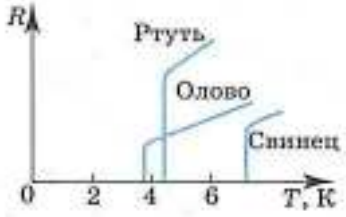


Рис. 8.8

ЗАПОМНИТЕ Явление полной потери металлом электрического сопротивления при определённой температуре получило название **сверхпроводимости**.

Удивительное свойство сверхпроводимости особенно наглядно было продемонстрировано на заре открытия этого явления в опытах со свинцовым кольцом, находящимся при температуре, близкой к абсолютному нулю. Если создать в цепи ток, а затем источник отключить, то в обычных проводниках ток очень быстро (практически мгновенно) затухает. Ток же, возникающий в сверхпроводнике, может сохраняться неограниченно долго благодаря отсутствию сопротивления. Один из таких опытов был произведён в 1959 г. Через 2,5 года после начала опыта никакого уменьшения силы тока в кольце отмечено не было.

Интерес к явлению сверхпроводимости в современной науке возрастал по мере обнаружения материалов, у которых сверхпроводимость наступала при более высоких температурах. До 1987 г. были известны сверхпроводники, обладающие этим свойством только при очень низких температурах — примерно 30 К. Такие температуры называют «гелиевыми», так как их можно получить только при сжижении гелия. Однако гелия в природе очень мало, техника его сжижения очень сложна. Но вот в марте 1987 г. стало известно, что обнаружены материалы, обладающие сверхпроводимостью при значительно более высокой температуре — около 100 К. Это известие вызвало подлинный энтузиазм у физиков. Казалось бы, что же здесь особенного: температура

сверхпроводимости всё равно очень низкая (–196 °С). Но всё дело в том, что для достижения этой температуры можно использовать жидкий азот, температура кипения которого 77 К. А азота в природе очень много (воздух на 80% состоит из азота), технология получения жидкого азота хорошо разработана, и стоит он недорого. Последние сообщения об исследованиях в области сверхпроводимости сулят большие перспективы: в научных исследованиях получены ещё более высокотемпературные сверхпроводящие материалы. Исследования в этой области ведутся очень интенсивно. Теоретически предсказана возможность получения в дальнейшем материалов, переходящих в сверхпроводящее состояние при комнатной температуре. Интересно и то, что такими сверхпроводящими материалами являются не какие-нибудь сложно получаемые материалы, а простая керамика. Из этого хрупкого материала в настоящее время научились получать сверхпроводящие пластины и проволоку, пригодные для технологического использования.

ИНТЕРЕСНО **Технические применения высокотемпературных сверхпроводников.** Получение высокотемпературных сверхпроводящих материалов открывает широкие возможности их технического применения.

В энергетике сверхпроводящие материалы могут произвести полный переворот. Сверхпроводящие кабели способны передавать огромную энергию на большие расстояния практически без потерь.

Сверхпроводящие обмотки электромагнитов дают возможность получить гораздо более сильные токи, чем обычные, и создавать таким образом очень сильное магнитное поле с индукцией порядка 10—20 Тл.

Отметим ещё одно удивительное применение высокотемпературной сверхпроводимости, связанное с давно занимающей умы инженеров идеей создания скоростных поездов, движущихся не на колёсах, а на «магнитной подушке».

Замечательное явление в 1945 г. продемонстрировал профессор Московского университета В. К. Аркадьев с помощью эффектного опыта. Он взял небольшой постоянный магнит и начал опускать его на верёвочке в свинцовую чашу, охлаждённую жидким гелием. При столь низкой температуре свинец становится сверхпроводником. При опускании магнита в чашу натяжение верёвочки ослабло, и довольно тяжёлый магнит повис в воздухе без всякой видимой поддержки. Сверхпроводящая чаша отталкивала магнит действием магнитных полей индукционных токов, создаваемых падающим магнитом в сверхпроводнике. Магнит «парит» над чашей, поддерживаемый действующим на него магнитным полем. Магнит не покоится над сверхпроводником, а непрерывно «дрожит», падая и отталкиваясь от сверхпроводника. Такое «парение» магнита над сверхпроводником (либо, наоборот, сверхпроводника над магнитом) называется *левитацией* (рис. 8.9). На явлении магнитной левитации и основана идея устройства поездов, которые, «паря» в воздухе над магнитным полем, развивали бы огромную скорость движения — несколько сотен километров в час.



Рис. 8.9

Зависимость сопротивления проводников от температуры. Температурный коэффициент сопротивления. Сверхпроводимость. Левитация

1. В чём причина зависимости сопротивления проводников от температуры? 2. При включении электрической лампы накаливания сила тока в первый момент значительно отличается от силы тока в лампе, когда она начнёт светиться. Объясните причину этого явления. 3. В чём состоит явление сверхпроводимости?

РЕШИТЕ

72.1. Электрическое сопротивление вольфрамовой нити электрической лампы при температуре 23 °С равно 4 Ом. Определите электрическое сопротивление нити при 0 °С. Температурный коэффициент электрического сопротивления вольфрама равен $4{,}8 \cdot 10^{-3}$ К$^{-1}$.

72.2. Чему равен температурный коэффициент электрического сопротивления материала проводника, если при нагревании от 0 до 100 °С его электрическое сопротивление увеличилось на 0,1 %?

72.3. Электрическая плитка мощностью 600 Вт рассчитана на напряжение 220 В. При работе плитки температура нихромовой нити (температурный коэффициент сопротивления $\alpha = 0{,}0001$ К$^{-1}$) равна 500 °С. Чему равно сопротивление плитки в нерабочем состоянии?

72.4. Угольный стержень соединён последовательно с железным стержнем такой же толщины. При каком соотношении их длин сопротивление данной комбинации не зависит от температуры? Температурные коэффициенты сопротивления угля и железа соответственно равны $\alpha_1 = -8 \cdot 10^{-4}$ К$^{-1}$ и $\alpha_2 = 6 \cdot 10^{-3}$ К$^{-1}$, удельные электрические сопротивления угля и железа считайте соответственно равными $\rho_1 = 4{,}10 \cdot 10^{5}$ Ом · м и $\rho_2 = 1{,}2 \cdot 10^{-7}$ Ом · м.

С помощью лабораторного оборудования соберите установку для исследования закона Ома для участка цепи. В качестве объекта исследования возьмите сначала резистор, а затем лампу накаливания. В каждом случае постройте график зависимости тока от напряжения и сравните их. Результаты экспериментов сохраните: они ещё вам понадобятся.

1. Сверхпроводники и их характеристики.
2. Высокотемпературные проводники и их особенности.
3. Левитация. Опыт Аркадьева.

§ 73. Электрический ток в растворах и расплавах электролитов

Повторите: электрический ток, ионы.

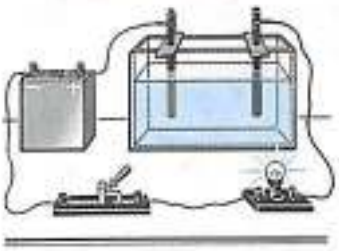


Рис. 8.10

Носители электрического заряда в растворах и расплавах электролитов. Электрический ток в металлах никакими химическими процессами не сопровождается. Это объясняется тем, что носителями тока в металлах являются электроны. Но существует такой класс проводников, в которых электрический ток всегда сопровождается определёнными химическими изменениями: растворы солей, кислот и оснований, т. е. растворы электролитов, а также их расплавы.

Соединим с источником тока последовательно лампу и электролитическую ванну с дистиллированной водой, в которую опущены угольные электроды. Химически чистая вода почти не проводит электрического тока. Замкнув цепь, мы увидим, что лампа не горит. Однако если мы растворим в воде какую-нибудь соль, например медный купорос, то лампа загорится, а на катоде из раствора выделится медь (рис. 8.10).

При прохождении электрического тока через растворы электролитов вместе с зарядом всегда переносится вещество.

ЗАПОМНИТЕ Явление, протекающее в растворе или расплаве электролита при пропускании через него электрического тока и связанное с переносом вещества, называется **электролизом**.

Отсюда следует, что носителями тока в этих проводниках являются заряженные атомы, или группы атомов, т. е. ионы.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ При растворении в воде солей, кислот и щелочей нейтральные молекулы этих веществ расщепляются на положительные и отрицательные ионы. Это явление называется *электролитической диссоциацией*. Растворы электролитов всегда содержат некоторое число ионов: катионов (положительных ионов) и анионов (отрицательных ионов).

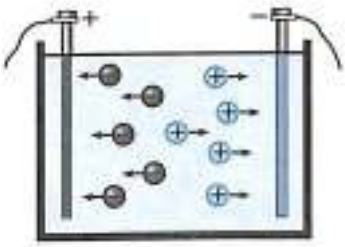


Рис. 8.11

Пока электрическое поле отсутствует, ионы совершают только беспорядочное тепловое движение. Но в электрическом поле ионы, подобно электронам в металлах, начинают дрейфовать в направлении действующей на них силы: катионы — к катоду, анионы — к аноду (рис. 8.11).

Опыт показывает, что сила тока при постоянном сопротивлении электролитов линейно зависит от напряжения, т. е. для растворов электролитов справедлив закон Ома.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Электрический ток в растворах (или расплавах) электролитов представляет собой перемещение ионов обоих знаков в противоположных направлениях.

Закон Фарадея. Электронная теория позволяет рассчитать массу веществ, выделяющихся на электродах при электролизе. Она равна произведению массы одного иона m_0 на число ионов N, которые осели на электроде. Масса одного иона $m_0 = \frac{M}{N_A}$, где M — молярная масса вещества, N_A — постоянная Авогадро.

Число ионов, осевших на электроде, можно выразить и через заряд Q, прошедший через электролит, и заряд одного иона q_0: $N = \frac{Q}{q_0}$.

Следовательно, $\frac{Q}{q_0} = \frac{m}{M} N_A$, откуда

$$m = m_0 N = \frac{MQ}{N_A q_0}.$$

Заряд любого иона равен заряду одновалентного иона, т. е. заряду электрона e, умноженному на валентность Z иона: $q_0 = eZ$. Таким образом,

$$m = \frac{M}{N_A eZ} Q = \frac{M}{N_A eZ} It. \qquad (73.1)$$

Величины N_A и e являются универсальными постоянными, а M и Z постоянны для данного вещества. Поэтому выражение $\frac{M}{N_A eZ}$ — величина, постоянная для данного вещества.

Зависимость, описываемая формулой (73.1), впервые была экспериментально установлена М. Фарадеем в 30-х гг. XIX в. и носит название *закон Фарадея.*

ЗАКОН ФАРАДЕЯ Масса вещества, выделившегося на электроде, пропорциональна заряду, прошедшему через раствор, или, другими словами, пропорциональна силе тока и времени.

Если постоянный множитель в формуле (73.1) обозначить через k:

$$k = \frac{M}{N_A eZ},$$

то закон Фарадея можно записать в виде

$$m = kQ = kIt.$$

ЗАПОМНИТЕ Коэффициент $k = \frac{M}{N_A eZ}$ называется **электрохимическим эквивалентом** данного вещества. Он выражается в килограммах на кулон (кг/Кл).

Определение заряда электрона. Закон Фарадея позволяет определить заряд одновалентного иона, т. е. заряд электрона. Из формулы (73.1) получаем

$$e = \frac{MQ}{mN_A Z} = \frac{MIt}{mN_A Z}.$$

Следовательно, чтобы определить заряд электрона e, необходимо в опыте с электролизом раствора какого-либо электролита, например медного купороса, определить массу выделившейся меди, время процесса и силу тока в цепи. Тогда, зная молярную массу меди и её валентность, можно вычислить заряд электрона. Опыты, выполненные с различными электролитами, показали, что $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Это и есть наименьший элементарный свободный электрический заряд, существующий в природе. Любой другой электрический заряд состоит из целого числа элементарных зарядов, т. е. кратен модулю заряда электрона.

ИНТЕРЕСНО

Технические применения электролиза. Электролиз получил широкое применение в технике. На нём основана *электрометаллургия* — получение щелочных и щёлочно-земельных металлов (алюминия, магния, бериллия и др.) путём электролиза расплавленных руд.

Для очистки металлов от примесей, например рафинирования меди, тоже используется явление электролиза.

Медные руды содержат сернистые соединения меди, её оксиды, а также примеси посторонних металлов (никель, свинец, сурьма, висмут и др.). Для получения меди, очищенной от примесей, медную пластину, выплавленную непосредственно из руды, помещают в качестве анода в раствор сернокислой меди ($CuSO_4$). Подбирая определённое напряжение на электродах ванны, можно добиться, чтобы на катоде выделялась только чистая металлическая медь. Посторонние примеси при этом на катод не попадают. Они переходят в раствор либо выпадают на дно ванны в виде осадка.

Электролитическим способом извлекают чистые металлы не только из раствора, но и из расплавов ионных кристаллов, которые и в твёрдом состоянии состоят из ионов. Таким образом добывают в настоящее время алюминий. Этот металл получают электрохимическим путём из расплавленных оксидов, содержащих оксид алюминия Al_2O_3 (бокситов). Расплавленные бокситы помещают в ванну, угольные дно и стенки которой служат катодом. Анодом служат угольные стержни, опущенные в ванну. Так как в этом процессе применяют очень сильные токи (в несколько десятков тысяч ампер), то за счёт выделяемой током теплоты вещество всё время поддерживается в расплавленном состоянии.

На явлении электролиза основаны такие распространённые в технике технологические процессы, как гальваностегия и гальванопластика. Для предохранения металлов от коррозии их поверхность часто покрывают трудно окисляемыми металлами, т. е. производят никелирование или хромирование. Этот процесс называется *гальваностегией*. Гальваностегию также применяют для покрытия ювелирных изделий тончайшими слоями серебра или золота. С этой целью покрываемый слоем другого металла предмет помещают в качестве

катода в электролитическую ванну. Анодом служит пластинка металла, которым требуется покрыть предмет, а ванна содержит раствор соли этого металла.



Б. С. Якоби

С помощью электролиза можно также изготовить рельефные металлические копии предметов. Этот процесс называется *гальванопластикой*, его изобрёл русский учёный Б. С. Якоби в 40-х гг. XIX в.

Для изготовления рельефной копии предмета его сначала покрывают каким-нибудь пластичным материалом (воском) и делают из этого материала слепок. Затем слепок покрывают графитом, чтобы сделать его электропроводным, и помещают в электролитическую ванну, в которой он служит катодом. Анодом и в этом случае является пластинка металла, из которого хотят изготовить рельефную копию, а ванна содержит раствор соли этого металла.

Закон Фарадея. Электролиз. Электролитическая диссоциация. Электрохимический эквивалент

1. Чистая вода не проводит электрический ток. Почему она становится проводником при растворении в ней солей, кислот или щелочей? 2. Что называется электрохимическим эквивалентом вещества? 3. Как можно определить заряд электрона?

РЕШИТЕ

73.1. Аэростат объёмом 250 м^3 нужно заполнить водородом при температуре 27 °С и давлении $2 \cdot 10^5$ Па. Какое количество электричества необходимо для этой цели пропустить при электролизе через раствор серной кислоты?

73.2. Никелирование металлического изделия продолжалось 5 ч при силе тока 0,3 А; площадь поверхности 120 см^2. Никель двухвалентен. Определите толщину слоя никеля. Молярная масса никеля $5{,}9 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, его плотность $8{,}8 \cdot 10^3$ кг/м^3.

С помощью лабораторного оборудования соберите схему, изображённую на рисунке 8.10. Проведите эксперимент. Определите массу меди, отложившейся на угольном электроде за определённый, зафиксированный вами интервал времени.

Технические применения электролиза.

§ 74. Электрический ток в газах

Повторите: электрический ток в газах.



Рис. 8.12

Несамостоятельный электрический разряд. Для изучения электропроводности газов укрепим две металлические пластины параллельно друг другу, соединим одну со стержнем, а другую с корпусом электрометра и сообщим им разноимённые заряды. Опыт показывает, что электрометр не разряжается, следовательно, через воздух между пластинами при небольших значениях напряжения электрический ток не проходит. Такой же результат получается при выполнении опыта в любом другом газе.

Внесём в пространство между пластинами пламя спички или спиртовки — электрометр быстро разряжается (рис. 8.12). Такой же результат можно получить, освещая воздух между пластинами электрической дугой. Эти опыты доказывают, что под действием пламени или света газ может стать проводником электрического тока.

ЗАПОМНИТЕ Явление прохождения электрического тока через газ, наблюдаемое только при условии какого-либо внешнего воздействия на газ, называется **несамостоятельным электрическим разрядом.**

Термическая ионизация. При повышении температуры газ становится проводником электрического тока, потому что часть нейтральных атомов или молекул газа превращается в ионы. Для отрыва электрона от атома необходимо совершить работу против сил кулоновского притяжения между положительно заряженным ядром и отрицательно заряженным электроном. Процесс отрыва электрона от атома называется ионизацией атома.

ЗАПОМНИТЕ Минимальная энергия, которую необходимо затратить для отрыва электрона от атома, называется **энергией ионизации.**

Электрон может быть оторван от атома при соударениях с другими атомами, если кинетическая энергия превысит энергию ионизации. Кинетическая энергия теплового движения атомов или молекул прямо пропорциональна абсолютной температуре, поэтому с повышением температуры газа увеличивается число соударений атомов или молекул, сопровождающихся ионизацией.

ЗАПОМНИТЕ Процесс возникновения свободных электронов и положительных ионов в результате столкновений атомов и молекул газа при высокой температуре называется **термической ионизацией.**

Частично или полностью ионизованный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы, называется **плазмой.**

Доля ионизованных атомов в газе очень быстро увеличивается с возрастанием температуры. Например, если при температуре $T = 10\,000$ К ионизовано менее 10 % общего числа атомов водорода, то при температуре выше 20 000 К водород практически полностью ионизован. При низких температурах любой газ является изолятором; при высоких температурах он превращается в плазму и становится проводником электрического тока.

Фотоионизация. Энергия, необходимая для отрыва электрона от атома или молекулы, может быть передана светом или невидимым излучением — ультрафиолетовым, рентгеновским.

ЗАПОМНИТЕ Ионизация атомов или молекул под действием света называется **фотоионизацией**.

В результате фотоионизации газ может превращаться в плазму и становиться проводником электрического тока.

Ионизация электронным ударом. Ионизация электронным ударом становится возможной тогда, когда электрон на длине свободного пробега λ приобретает кинетическую энергию W_k, достаточную для совершения работы отрыва электрона от атома ($A_и$): $W_k \geqslant A_и$, или

$$eE\lambda \geqslant A_и, \qquad (74.1)$$

где E — напряжённость электрического поля; λ — длина свободного пробега электрона.

Энергия связи электронов в атомах и молекулах (энергия ионизации) обычно выражается в электронвольтах (эВ).

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Один электронвольт равен работе, которую совершает электрическое поле при перемещении электрона или другой частицы, обладающей элементарным зарядом, между точками поля, напряжение между которыми равно 1 В:

$$1 \text{ эВ} = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Энергия ионизации атома водорода, например, равна 13,6 эВ, молекулы кислорода — 12 эВ, азота — 16 эВ и т. д.

Самостоятельный электрический разряд. Опыт показывает, что если постепенно повышать напряжение между двумя электродами в газе, то можно достигнуть некоторого его значения, зависящего от природы газа и давления, при котором в газе возникает электрический ток и без воздействия внешних ионизаторов.

ЗАПОМНИТЕ Явление прохождения через газ электрического тока, не зависящего от внешних ионизаторов, называется **самостоятельным разрядом** в газе.

Основной механизм ионизации газа при самостоятельном электрическом разряде — ионизация атомов и молекул ударами электронов.

Развитие самостоятельного электрического разряда в газе протекает следующим образом. Как только в газе появляется свободный электрон, он под действием электрического поля ускоряется, его кинетическая энергия возрас-

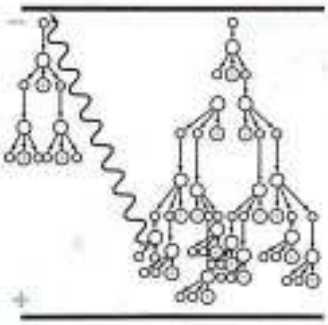


Рис. 8.13

тает, и если выполняется условие $eE\lambda \geqslant A_и$, то он при соударении с молекулой ионизует её. Первичный электрон и вторичный, возникший в результате ударной ионизации, вновь ускоряются под действием электрического поля, и каждый из них при следующих соударениях освобождает ещё по одному электрону и т. д. Число свободных электронов нарастает лавинообразно до тех пор, пока они не достигнут анода (рис. 8.13).

Положительные ионы, возникающие в газе, движутся под действием электрического поля от анода к катоду. При ударах положительных ионов о катод, а также под действием излучения, возникающего при развитии разряда, с катода могут освобождаться новые электроны. Они разгоняются электрическим полем и образуют новые электронно-ионные лавины, и этот процесс может продолжаться непрерывно.

Концентрация ионов в плазме по мере развития разряда увеличивается, и сила тока в цепи при наличии самостоятельного разряда обычно ограничивается лишь внутренним сопротивлением источника тока и электрическим сопротивлением других элементов цепи.

Искровой разряд.

ЗАПОМНИТЕ Если источник тока не способен поддерживать самостоятельный электрический разряд в течение длительного времени, то наблюдается форма самостоятельного разряда, называемая **искровым разрядом**.

Искровой разряд прекращается через короткий промежуток времени после начала разряда в результате значительного уменьшения напряжения. Примеры искрового разряда — молнии, искры, возникающие при расчёсывании волос, разделении листов бумаги, разряде конденсатора.

ИНТЕРЕСНО Самые большие искры — молнии — наблюдаются во время грозы. Исследования показали, что причиной возникновения гроз является разделение электрических зарядов в грозовых облаках. При дроблении водяных капель и кристаллов льда крупные капли и кристаллы приобретают избыточный отрицательный заряд, а мелкие — положительный. Восходящие потоки воздуха в грозовом облаке поднимают мелкие капли и кристаллы к вершине облака, крупные капли и кристаллы падают к его основанию. Отрицательный заряд основания облака наводит положительный заряд на проводящей земной поверхности (рис. 8.14). Разность потенциалов между основанием облака на высоте 3—4 км и поверхностью Земли достигает 20—100 млн вольт. Молния переносит из облака 20—30 Кл отрицательного электрического заряда, сила тока в молнии достигает 10—20 кА, длительность импульса тока в канале молнии несколько

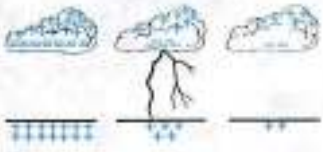


Рис. 8.14

десятков микросекунд. Самостоятельный электрический разряд между газовым облаком и Землёй через некоторое время сам собой прекращается, так как бóльшая часть избыточных электрических зарядов в грозовом облаке нейтрализуется электрическим током, протекающим по плазменному каналу молнии.

При нарастании силы тока в канале молнии происходит нагревание плазмы до температуры свыше 10^4 К. Изменения давления в плазменном канале молнии при нарастании силы тока и прекращении разряда вызывают звуковые явления, называемые громом.

На Земле каждые сутки происходит около 300 гроз, среднее значение силы тока «грозовой машины», сообщающей Земле отрицательный электрический заряд, составляет около 1800 А. Отрицательный заряд Земли около $6 \cdot 10^5$ Кл, напряжённость электрического поля у поверхности Земли составляет примерно 100 В/м.

Между отрицательно заряженной Землёй и положительно заряженными верхними слоями атмосферы напряжение достигает примерно 40 кВ. В атмосферном воздухе всегда содержится небольшое количество ионов. Электрический ток, создаваемый этими ионами, разряжает Землю, но «грозовая машина» пополняет этот заряд с каждым ударом молнии. Если бы грозы прекратились по всей Земле, то электрический заряд был бы нейтрализован током ионов в атмосферном воздухе примерно за полчаса. Молнии возникают не только в водяных облаках, но и в облаках пыли и газов, образующихся при извержениях вулканов.

Коронный разряд.

ЗАПОМНИТЕ В сильно неоднородных электрических полях, образующихся, например, между остриём и плоскостью или между проводом линии электропередачи и поверхностью Земли, возникает особая форма самостоятельного разряда в газах, называемая **коронным разрядом.**

Основная особенность коронного разряда заключается в том, что процесс ионизации атомов электронным ударом происходит лишь на небольших расстояниях от одного из электродов в области с высокими значениями напряжённости электрического поля.

ИНТЕРЕСНО С коронным разрядом приходится считаться при передаче электроэнергии на большие расстояния. Наибольшая напряжённость поля создаётся около проводов. Так как электроэнергия на большие расстояния передаётся по сравнительно тонким проводам при высоком напряжении между ними, то около проводов происходит довольно интенсивный коронный разряд. Это ведёт к потере части передаваемой электроэнергии. Потери на коронный разряд в таких линиях тем больше, чем выше напряжение между проводами и чем больше протяжённость линии.

Поскольку для уменьшения тепловых потерь в линиях электропередачи необходимо повышать напряжение между проводами, уменьшение потерь на коронный разряд должно проводиться не за счёт снижения напряжения ЛЭП.

Это можно было бы сделать путём увеличения толщины проводов и тем самым уменьшения напряжённости поля около них. Но значительное увеличение толщины проводов практически невозможно. Например, при увеличении диаметра проводов в 10 раз площадь их поперечного сечения, а следовательно, и масса проводов увеличилась бы в 100 раз! Во сколько же раз было бы необходимо увеличивать прочность мачт опоры проводов и изоляторов, а также расход цветных металлов — меди и алюминия?

Для снижения потерь на коронный разряд провода ЛЭП делают не одиночными, а каждый провод расщепляют на несколько частей (проводов). Например, для ЛЭП с напряжением 500 кВ каждый провод расщепляют на три части. С помощью распорок между составными частями провода обеспечивают такое их расположение, чтобы сечения проводов вдоль линии располагались в вершинах равностороннего треугольника.

Расположенные таким образом три части провода представляют собой как бы один пустотелый провод, но значительно большего радиуса кривизны. Для ЛЭП, рассчитанной на 750 кВ, каждый провод составляют из четырёх частей.

Коронный разряд успешно используется в электрофильтрах многих производств, где необходимо очищать газы, выходящие из топок, от твёрдых и жидких примесей. Это даёт возможность извлекать из газов ценные продукты, которые раньше уходили в атмосферу и загрязняли её.

Дуговой разряд.

ЗАПОМНИТЕ Известна ещё одна важная форма самостоятельного разряда в газах, получившая название **электрической дуги**.

Она была впервые открыта профессором физики Петербургской медико-хирургической академии В. В. Петровым в 1802 г. Слегка раздвинув на небольшое расстояние два соприкасающихся угольных электрода, присоединённые к источнику тока, мы увидим между концами углей яркое свечение газа, а сами угли при этом раскаляются.

Рассматривая дуговой разряд через тёмное стекло, можно заметить, что свет исходит преимущественно от концов углей.

Свечение самой дуги — яркой изогнутой полоски, образующейся в газовом промежутке между концами углей, — значительно слабее. Температура углей очень высока. Наиболее горячим является углубление, образующееся на аноде, которое называется кратером. Его температура при атмосферном давлении достигает 4000 °С.

Для горения дуги достаточно сравнительно небольшого напряжения: 40—50 В, но сила тока в дуге достигает десятков и даже сотен ампер. Это указывает на то, что сопротивление газа в дуговом разряде сравнительно мало.

Какие частицы служат носителями зарядов в дуге? Когда угольные электроды приводят в контакт, они соприкасаются в отдельных небольших участках, сопротивление этих участков велико, и они сильно разогреваются. Когда угли раздвигают, электроны, испускаемые раскалёнными участками катода,

ионизуют воздух и обеспечивают большую концентрацию заряженных частиц в дуге.

ИНТЕРЕСНО Дуговой разряд находит важные технические применения. Впервые дуга применена русским инженером П. Н. Яблочковым для освещения (1876). Вследствие высокой температуры дуга широко используется для сварки и резания металлов. Такой способ сварки впервые был разработан русскими изобретателями Н. И. Бенардосом (1885) и Н. Г. Славяновым (1890).

В настоящее время электрическую дугу применяют в промышленных электропечах для плавки стали. Дуга в этих печах образуется между самим расплавленным металлом и угольными электродами, которые приводят с ним в соприкосновение, а затем разводят. Сила тока в такой дуге достигает десятков тысяч ампер.

Тлеющий разряд. До сих пор мы рассматривали самостоятельный разряд в газах при атмосферном давлении. Для такого разряда необходима большая напряжённость электрического поля. Однако в разреженном газе самостоятельный разряд может возникнуть в электрическом поле значительно меньшей напряжённости.

Это можно обнаружить при помощи опыта, используя стеклянную трубку с двумя металлическими электродами и патрубком, присоединённым к вакуумному насосу (рис. 8.15).

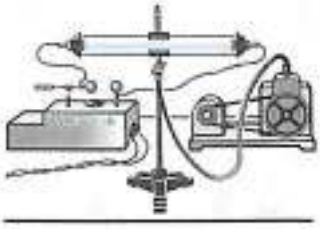


Рис. 8.15

Присоединим электроды к источнику высокого напряжения. Мы обнаружим, что при атмосферном давлении тока в цепи нет (или он очень мал). Но если при помощи насоса начать откачивать газ из трубки, в ней возникает разряд, сопровождающийся свечением газа.

В разреженном газе электроны реже сталкиваются с атомами, длина свободного пробега электрона возрастает, и за время между столкновениями он успевает приобрести достаточную для ионизации энергию в электрическом поле с меньшей напряжённостью. За счёт электронно-ионной лавины в газе возникает разряд. Между электродами трубки образуется светящийся жгут. Если трубка заполнена воздухом, то светящийся жгут имеет малиновый цвет.

По мере дальнейшего уменьшения давления канал разряда расширяется и заполняет почти всё сечение трубки, а около катода образуется тёмное пространство.

ЗАПОМНИТЕ Разряд, возникающий при пониженном давлении, называется **тлеющим разрядом**.

При давлении 300—500 Па видны две основные области тлеющего разряда: катодное тёмное пространство и светящийся столб у анода (рис. 8.16). Цвет свечения зависит от природы газа.



Рис. 8.16

ИНТЕРЕСНО Свечение при тлеющем разряде нашло широкое применение в осветительной технике. Для рекламы, например, используются различные газосветные трубки. Широко применяются лампы дневного света. Электрический разряд в них происходит в парах ртути. При этом возникает ультрафиолетовое излучение, которое поглощается слоем специального вещества, покрывающего изнутри стенки лампы, и вызывает его свечение. Излучение этого вещества близко к дневному свету. Лампы дневного света более долговечны и потребляют меньше электрической энергии, чем лампы накаливания.

Несамостоятельный разряд. Термическая ионизация. Фотоионизация. Ионизация электронным ударом. Самостоятельный электрический разряд. Искровой разряд. Коронный разряд. Дуговой разряд. Тлеющий разряд

1. Опишите опыт, в котором обнаруживается несамостоятельный электрический разряд в воздухе. 2. Что такое термическая ионизация? 3. Что называется плазмой? 4. Какие причины могут вызывать несамостоятельный электрический разряд? 5. Чем отличается самостоятельный электрический разряд в газе от несамостоятельного разряда? 6. При каких условиях возникает самостоятельный электрический разряд в газе? 7. Каков механизм развития самостоятельного электрического разряда? 8. Почему электрический разряд между грозовым облаком и Землёй происходит за очень короткое время? 9. Каковы характерные признаки дугового электрического разряда? 10. При каких условиях возникает коронный разряд?

Вспомните, что происходит в атмосфере при разряде молнии. Опишите подробно оптические и звуковые явления, запахи, их последовательность. Объясните происхождение каждого из них.

1. Г. Рихман — исследователь атмосферного электричества.
2. Правильное поведение человека во время грозы.

§ 75. Электрический ток в вакууме

Повторите: электрический ток, вакуум.

Электронная эмиссия. Если два электрода поместить в герметичный сосуд и удалить из сосуда воздух, то, как показывает опыт, электрический ток в вакууме не возникает. Причина заключается в том, что в вакууме нет заряженных частиц, способных переносить электрические заряды от одного электрода к другому. Заряженные частицы — электроны и положительно заряженные ионы — есть в каждом из электродов, но они не могут выйти в вакуум, так как удерживаются силами кулоновского притяжения.

Для освобождения электрона с поверхности твёрдого тела нужно совершить работу против сил электростатического притяжения, действующих на отрицательный электрон со стороны положительно заряженных атомных ядер.

ЗАПОМНИТЕ Работа, которую нужно совершить для освобождения электрона с поверхности тела, называется **работой выхода**.

Работа выхода обычно выражается в электронвольтах и для большинства металлов лежит в пределах от 2 до 6 эВ. Например, для цезия она равна 1,8 эВ, для серебра — 4 эВ, для никеля — 4,9 эВ.

Американский учёный и изобретатель Т. Эдисон в 1879 г. обнаружил, что в вакуумной стеклянной колбе может возникнуть электрический ток, если один из находящихся в ней электродов нагреть до высокой температуры.

Для исследования природы электрического тока, возникающего в вакууме при нагревании одного из электродов, поставим следующие опыты. Пусть в стеклянном баллоне находятся два электрода, один из которых представляет собой металлический диск, другой — тонкую металлическую проволоку, свёрнутую в спираль. Концы спирали укреплены на металлических стержнях, имеющих два выхода для подключения в электрическую цепь. Соединив концы спирали с источником тока, можно нагреть её до высокой температуры.

Опыт показывает, что если соединить стержень заряженного электрометра с диском, а корпус с холодной проволочной спиралью, то электрометр не разряжается ни при положительном, ни при отрицательном заряде на стержне (рис. 8.17).

Подключим источник тока к выводам проволочной спирали. Теперь электрометр быстро разряжается при положительном потенциале стержня, при отрицательном потенциале стержня электрометр по-прежнему не разряжается.

Эти опыты показывают, что нагретая спираль испускает частицы, обладающие отрицательным электрическим зарядом. Изучение свойств частиц, испускаемых нагретыми телами, показало, что это электроны.

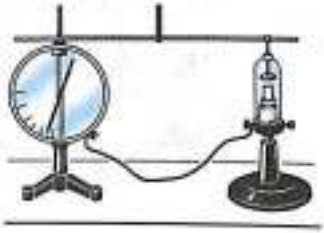


Рис. 8.17

ЗАПОМНИТЕ Явление испускания свободных электронов с поверхности нагретых тел называется **термоэлектронной эмиссией**.

Явление термоэлектронной эмиссии объясняется тем, что при повышении температуры тела увеличивается кинетическая энергия некоторой части электронов в веществе. Если кинетическая энергия электрона превысит работу выхода, то он может преодолеть действие сил притяжения со стороны положительных ионов и выйти с поверхности тела в вакуум.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Термоэлектронная эмиссия напоминает процесс испарения жидкости или твёрдого тела с той разницей, что с нагретого металла «испаряются» электроны, а из жидкости — нейтральные молекулы.

На явлении термоэлектронной эмиссии основана работа различных электровакуумных приборов.

Электронно-лучевая трубка.

ЗАПОМНИТЕ Прибор, в котором используется пучок электронов, свободно летящих в пространстве за анодом, называется **электронно-лучевой трубкой** (рис. 8.18).

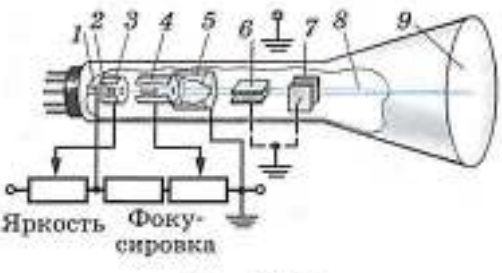


Рис. 8.18

Источником электронов в электронно-лучевой трубке служит катод *2*, нагреваемый нитью накала *1*. Электроны разгоняются электрическим полем между катодом и двумя анодами *4* и *5*. Изменяя напряжение на аноде *4*, можно фокусировать электронный пучок *8*, т. е. изменять площадь поперечного сечения электронного пучка на экране. Изменяя напряжение между катодом *2* и управляющим электродом *3*, можно изменять интенсивность электронного пучка (яркость пятна на экране).

Внутренняя поверхность стеклянного баллона электронно-лучевой трубки напротив анода, покрытая тонким слоем кристаллов, является экраном *9*. Поток электронов, пролетевших через отверстие в аноде электронно-лучевой трубки, — электронный пучок — вызывает свечение кристаллов, и сквозь стекло экрана видно светящееся пятно в месте попадания электронов на экран.

С помощью электрических или магнитных полей можно управлять движением электронов на их пути и заставлять электронный пучок «рисовать» любую картину на экране.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Эти возможности широко применялись для получения изображений на экране электронно-лучевой трубки телевизора, называемой *кинескопом*.

В кинескопе управление электронным пучком осуществлялось с помощью переменного магнитного поля, создаваемого двумя катушками, надетыми на горловину трубки.

В трубке электронно-лучевого осциллографа между анодом и экраном находятся две пары параллельных металлических пластин *6* и *7*. Эти пластины называются управляющими электродами. Одна пара пластин расположена вертикально, а другая — горизонтально. Если подать напряжение на вертикально расположенные пластины, то электронный пучок будет отклоняться в горизонтальном направлении, подача напряжения на горизонтальные пластины вызывает вертикальное смещение пучка. Смещение пятна на экране трубки пропорционально приложенному напряжению, поэтому электронный осциллограф может использоваться в качестве электроизмерительного прибора.

Для исследования быстропеременных электрических процессов в осциллографе осуществляется развёртка — равномерное перемещение электронного пучка по горизонтали с быстрым отбросом назад. Для того чтобы пучок перемещался вдоль горизонтальной оси с постоянной скоростью, напряжение на вертикально отклоняющих пластинах должно изменяться линейно по времени, а для быстрого возвращения пучка в исходное положение напряжение должно очень быстро падать до нуля. Такое напряжение носит название *пилообразного* (рис. 8.19).



Рис. 8.19

С помощью специальных преобразователей изменение любой физической величины можно преобразовать в изменение напряжения и затем исследовать с помощью осциллографа. Например, присоединив выводы микрофона ко входу электронного осциллографа, можно исследовать звуковые колебания.

Электрический ток в вакууме. Электронная эмиссия. Термоэлектронная эмиссия

1. Можно ли создать электрический ток в вакууме? 2. Что препятствует выходу электронов с поверхности тел? 3. Что называется работой выхода? 4. Как устроена электронно-лучевая трубка? 5. Каким образом осуществляется управление яркостью электронного пучка? 6. Каким образом осуществляется равномерное движение пучка по экрану при включении развёртки? 7. Почему для осуществления развёртки применяется напряжение пилообразной формы?

ЗАДАЧА 1. Рассчитайте, с какой скоростью электроны достигают анода, если напряжение между анодом и катодом лампы равно 100 В.

Решение. Если пренебречь начальной скоростью электронов, вылетающих из катода ($v_0 = 0$), то приобретённая ими кинетическая энергия $\frac{mv^2}{2}$ равна работе eU, которая совершается при перемещении электронов в электрическом поле: $\frac{mv^2}{2} = eU$. Отсюда

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 100 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}}{9{,}1 \cdot 10^{-31}}}\ (\text{м/с}) = 5{,}9 \cdot 10^6\ \text{м/с}.$$

ЗАДАЧА 2. Электрон влетает в плоский конденсатор со скоростью $4 \cdot 10^7$ м/с параллельно его пластинам. Под действием электрического поля электрон смещается от первоначального направления на 2 мм. Длина конденсатора 6 см, расстояние между его пластинами 0,5 см. Определите напряжение между пластинами конденсатора. Масса электрона $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг, заряд $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Решение. При движении электрона в конденсаторе его абсцисса изменяется по закону равномерного движения $x = vt$, так как в направлении оси OX сила не действует (рис. 8.20), ордината же изменяется по закону равноускоренного движения $y = at^2/2$ за счёт действия в этом направлении электрической силы. В момент вылета электрона из конденсатора его координаты соответственно равны $x = l$ и $y = h$. Учитывая это, можно записать:

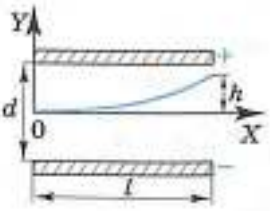


Рис. 8.20

$$l = vt, \qquad h = at^2/2.$$

Исключив время из этих уравнений, получим

$$h = \frac{al^2}{2v^2}. \tag{1}$$

Ускорение можно определить из второго закона Ньютона $a = \frac{F}{m}$, где $F = eE$. Следовательно, $a = \frac{eE}{m}$. Так как $E = \frac{U}{d}$, то $a = \frac{eU}{md}$. Отсюда

$$U = \frac{amd}{e}.$$

Заменив здесь a его значением из выражения (1), окончательно для напряжения будем иметь

$$U = \frac{2v^2hmd}{l^2e} = \frac{2 \cdot 16 \cdot 10^{14} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-2}}{36 \cdot 10^{-4} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}} \text{ (В)} = 50 \text{ В}.$$

РЕШИТЕ

75.1. Определите скорость электронов в электронно-лучевой трубке, если анодное напряжение равно 8 кВ.

75.2. В поле, созданное пластинами вертикального отклонения электронного пучка, влетает электрон. Вектор скорости электрона направлен параллельно пластинам. Длина пластин 2 см, расстояние между ними 1 см. Чему равна скорость электрона, если за время движения в поле он отклоняется на 1 мм? Напряжение между пластинами равно 30 В.

С помощью учителя изучите работу электронно-лучевой трубки осциллографа.

§ 76. Электрон

Повторите: электрон.

Открытие электрона. Определение заряда одновалентного иона (см. § 73) не может служить строгим доказательством, что в природе существуют элементарные электрические заряды. Можно, например, предположить, что все одновалентные ионы имеют различные электрические заряды, но их среднее значение равно элементарному заряду e.

Для того чтобы выяснить, существует ли в природе элементарный заряд, необходимо было измерить не суммарное количество электричества, переносимое большим числом ионов, а заряды отдельных ионов. Неясным был и вопрос о том, обязательно ли электрический заряд связан с частицами вещества и если связан, то с какими именно.

Важный вклад в решение этих вопросов был сделан в конце XIX в. при исследовании явлений, связанных с электрическим током в разреженных газах. В этих опытах было обнаружено свечение стекла разрядной трубки за анодом. На светлом фоне светящегося стекла была видна тень от анода, как будто бы свечение стекла вызывалось каким-то невидимым излучением, распространяющимся прямолинейно от катода к аноду (рис. 8.21).



Рис. 8.21

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Это невидимое излучение назвали *катодными лучами*. В 1895 г. Ж. Перреном было установлено, что катодные лучи в действительности являются потоком отрицательно заряженных частиц.

Английский физик Дж. Дж. Томсон (1856—1940) в 1897 г. выполнил опыты по отклонению электронов в электрическом и магнитном полях. Направляя пучок катодных лучей перпендикулярно вектору $\vec{B}$ индукции однородного магнитного поля, он измерил радиус окружности, по которой двигались катодные лучи. Если катодные лучи представляют собой поток заряженных частиц, каждая из которых обладает электрическим зарядом e и массой m, то при их движении в магнитном поле выполняется условие



Дж. Дж. Томсон

$$evB = \frac{mv^2}{r}.$$

Отсюда отношение заряда e частицы к её массе m равно:

$$e/m = v/(Br). \qquad (76.1)$$

Для определения скорости движения частиц Томсон выполнил второй опыт. В этом опыте на катодные лучи, кроме магнитного поля с индукцией $\vec{B}$, дейст-

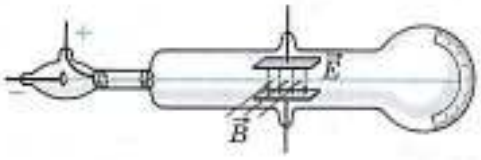


Рис. 8.22

вовало электрическое поле (рис. 8.22). Напряжённость $\vec{E}$ поля подбиралась такой, чтобы при противоположных направлениях векторов магнитной силы $\vec{F}_м$ и электрической силы $\vec{F}_э$ их действие на частицы катодных лучей компенсировалось и пучок катодных лучей не отклонялся. При равенстве модулей сил ($F_э = F_м$) выполняется условие

$$eE = evB,$$

из которого можно определить скорость v частиц по известным значениям индукции магнитного поля и напряжённости электрического поля: $v = E/B$. Подставив выражение для скорости в уравнение (76.1), мы сможем выразить отношение заряда частицы к её массе через напряжённость электрического поля, индукцию магнитного поля и радиус кривизны траектории движения частиц в магнитном поле, т. е. найти удельный заряд частицы:

$$\frac{e}{m} = \frac{E}{B^2 r}.$$

В опытах Дж. Дж. Томсона было установлено, что отношение электрического заряда каждой из частиц катодных лучей к её массе является величиной, одинаковой для всех частиц. Если предположить, что каждая частица катодных лучей имеет заряд, равный элементарному заряду e, то приходится сделать вывод, что масса частицы катодных лучей примерно в 1870 раз меньше массы самого лёгкого из известных атомов — атома водорода.

Далее Дж. Дж. Томсон установил, что отношение заряда частицы катодных лучей к её массе получается одинаковым при наполнении трубки различными газами и при изготовлении катода из различных металлов. Следовательно, в состав атомов различных элементов входили одинаковые частицы.

На основании результатов своих опытов Дж. Дж. Томсон сделал вывод о делимости атомов вещества.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Из атома любого химического элемента могут быть вырваны отрицательно заряженные частицы с массой, меньшей одной тысячной массы атома водорода. Все эти частицы имеют одинаковую массу и обладают одинаковыми электрическими зарядами. Эти частицы называются электронами.

По современным измерениям удельный заряд электрона равен:

$$e/m = 1{,}7588 \cdot 10^{11}\ \text{Кл/кг}.$$

Опыт Милликена. Существование элементарного электрического заряда окончательно было доказано в опытах, которые выполнил в 1909—1912 гг. американский физик Р. Милликен. В этих опытах измерялась скорость движения капель масла в однородном электрическом поле между двумя металлическими пластинками. Капля масла, не имеющая электрического заряда, из-за сопротивления воздуха падает с некоторой постоянной скоростью.

Если на своём пути капля встречается с ионом и приобретает электрический заряд q, то на неё, кроме силы тяжести и силы сопротивления воздуха, действует ещё кулоновская сила $\vec{F}_э$ со стороны электрического поля. В результате изменения силы, действующей на каплю, изменяется скорость движения. Измеряя скорость движения капли и зная напряжённость электрического поля, в котором происходило её движение, Милликен мог определить заряд капли.

Опыт Милликена был повторен в 1913 г. российским учёным А. Ф. Иоффе. В этих опытах вместо капель масла использовались металлические пылинки. Изменением напряжения между пластинами достигалось условие равенства кулоновской силы и силы тяжести, и пылинка в этом случае оставалась неподвижной между пластинами конденсатора. Из равенства силы тяжести и электрической силы следует:

$$mg = q_1 E_1.$$

При воздействии на пылинку рентгеновским излучением её заряд изменялся, и для уравновешивания силы тяжести нужно было изменить напряжённость электрического поля между пластинами:

$$mg = q_2 E_2.$$

По измеренным значениям напряжённости электрического поля можно было определить отношение электрических зарядов пылинки:

$$mg = q_1 E_1 = q_2 E_2 = \ldots = q_n E_n;$$

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{E_1}{E_2}, \quad \frac{q_3}{q_1} = \frac{E_1}{E_3}, \quad \ldots, \quad \frac{q_n}{q_1} = \frac{E_1}{E_n}.$$

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Опыты Милликена и Иоффе показали, что заряды капель и пылинок всегда изменяются скачкообразно, кратно заряду электрона. Минимальная «порция» электрического заряда — это элементарный электрический заряд, равный

$$e = 1{,}6022 \cdot 10^{-19}\ \text{Кл}.$$

Электрический заряд любого тела всегда целочисленно кратен элементарному электрическому заряду. Меньших «порций» электрического заряда, способных переходить от одного тела к другому, в природе нет. Зная заряд электрона и его удельный заряд, можно вычислить массу электрона:

$$m = 9{,}1095 \cdot 10^{-31}\ \text{кг}.$$

Катодные лучи. Удельный заряд электрона

1. Как был открыт электрон? 2. На каком основании можно предположить, что масса электрона значительно меньше массы атома водорода? 3. Из каких опытов следует, что в состав атомов всех элементов входят одинаковые электроны? 4. Что было доказано опытами Милликена и Иоффе?

Опыты Милликена по определению удельного заряда электрона.

§ 77. Электрический ток в полупроводниках

Повторите: полупроводники.

Полупроводники. Многие вещества в кристаллическом состоянии не являются такими хорошими проводниками электрического тока, как металлы, но их нельзя отнести и к диэлектрикам, так как они не являются хорошими изоляторами. Такие вещества долгое время не привлекали особого внимания учёных и инженеров. Одним из первых начал систематические исследования физических свойств таких веществ, называемых сегодня полупроводниками, А. Ф. Иоффе.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Удельное сопротивление типичных проводников имеет значение 10^{-8}—10^{-6} Ом · м, диэлектриков — 10^{10}—10^{16} Ом · м, а удельное сопротивление полупроводников при комнатной температуре находится в широком интервале от 10^{-3} до 10^{7} Ом · м.

К полупроводникам относится огромное большинство веществ, масса которых составляет 4/5 массы земной коры. Это ряд элементов (германий, кремний, селен и др.), множество минералов, различные оксиды, сульфиды, теллуриды и другие химические соединения. Полупроводники оказались не просто «плохими проводниками», а особым классом веществ со многими замечательными физическими свойствами.

Зависимость сопротивления полупроводников от внешних условий. Наиболее характерным свойством полупроводников является то, что их удельное сопротивление резко изменяется под влиянием некоторых внешних воздействий. Включим, например, германиевый кристалл *1* при комнатной температуре в цепь, содержащую источник тока и гальванометр (рис. 8.23). Мы увидим, что стрелка гальванометра отклоняется незначительно, т. е. сила тока в цепи мала. Значит, полупроводник при комнатной температуре имеет большое электрическое сопротивление.

Нагревая полупроводник, мы заметим, что стрелка гальванометра отклоняется на больший угол, следовательно, при нагревании удельное сопротивление полупроводника уменьшается. Если же охладить полупроводник, например опустив в стакан с холодной водой, то его сопротивление увеличится. При очень низких температурах удельное электрическое сопротивление многих полупроводников становится таким же большим, как и у диэлектриков.

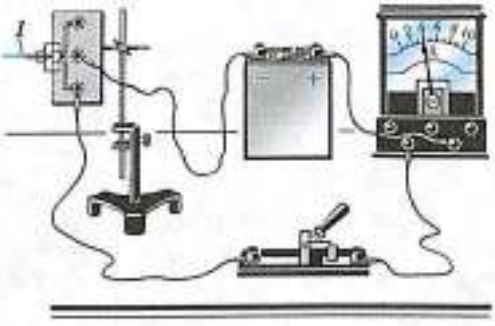


Рис. 8.23

На рисунке 8.24 изображён график зависимости удельного сопротивления полупроводника от температуры (кривая *1*).

Для сравнения на том же рисунке дан график *2* этой зависимости для металлического проводника. Как видно из графиков, сопротивление полупроводников, в отличие от металлов, уменьшается с ростом температуры. И это изменение сопротивления с изменением температуры происходит более резко, чем у металлов.

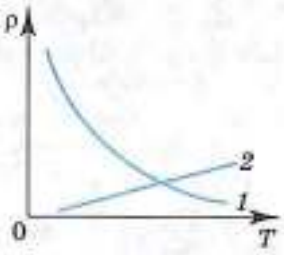


Рис. 8.24

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Из полупроводниковых материалов, удельное сопротивление которых особенно резко изменяется с изменением температуры, изготавливают *терморезисторы*.

Ими пользуются для измерения температуры, а также как чувствительными элементами (датчиками), реагирующими на изменения температуры в автоматических устройствах.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Сопротивление полупроводников уменьшается под действием освещения, причём у некоторых весьма значительно. Это явление получило название *фотопроводимости*. Из таких полупроводников делают *фоторезисторы*, применяемые для управления током в цепи за счёт изменения освещения.

Заменим терморезистор в описанном выше опыте фоторезистором *1* (рис. 8.25), который в начале опыта закрыт непрозрачным экраном. Убрав экран, по отклонению стрелки мы убедимся, что освещение вызывает значительное уменьшение сопротивления фоторезистора.

Итак, удельное сопротивление полупроводников резко уменьшается при их нагревании или освещении. Это позволяет использовать полупроводники в различных автоматических устройствах.

ИНТЕРЕСНО Рассмотрим, например, как работает простейшее полупроводниковое термореле, схема которого приведена на рисунке 8.26. Это реле может быть использовано, в частности, для сигнализации о том, что в помещении с электронагревателем достигнута заданная температура.

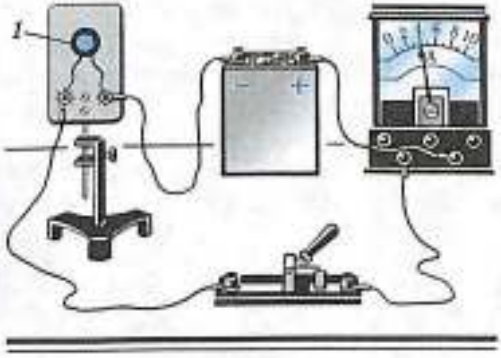


Рис. 8.25

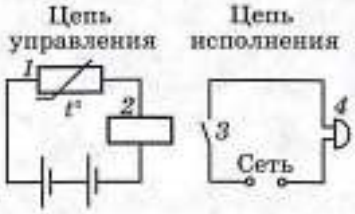


Рис. 8.26

Когда температура в помещении, в котором находится терморезистор *1*, низка, в цепи течёт электрический ток, недостаточный для срабатывания электромагнитного реле *2*. Когда температура в помещении достигает необходимого значения, сила тока в цепи возрастает до такого значения, при котором реле срабатывает. При этом замыкаются контакты *3*, включающие цепь исполнения, содержащую сигнализатор,— звонок *4*.

Природа электрического тока в полупроводниках.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Экспериментально установлено, что электрический ток в полупроводниках не сопровождается переносом вещества — никаких химических изменений с ними не происходит. Отсюда следует, что носителями тока в полупроводниках, как и в металлах, являются электроны.

Однако между полупроводниками и металлами имеются существенные различия. В чём же причина различия свойств полупроводников и металлов?

Мы уже говорили о том, что у металлов имеются электроны, которые сравнительно слабо связаны с атомами. Это валентные электроны, находящиеся на внешних электронных оболочках. Валентные электроны металлов легко отделяются от атомов и образуют электронный газ, концентрация которого очень велика. Эти электроны (электроны проводимости) принадлежат всей кристаллической решётке и, подобно молекулам в обычном газе, свободно перемещаются между ионами по всему проводнику. Именно этим обусловлена высокая проводимость металлов.

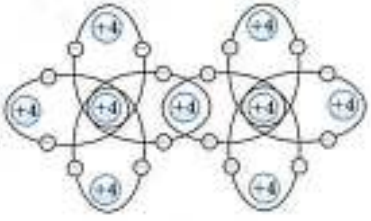


Рис. 8.27

В полупроводниках валентные электроны значительно сильнее связаны с атомами. Поэтому концентрация электронов проводимости при комнатной температуре в полупроводниках незначительна — она в миллиарды раз меньше, чем у металлов, и удельное сопротивление полупроводников при низкой температуре велико — оно близко к удельному сопротивлению диэлектриков. Почему же оно уменьшается при нагревании полупроводников? Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим схему строения какого-либо типичного полупроводника, например кремния (рис. 8.27).

Собственная проводимость. Атом кремния четырёхвалентен. В кристалле кремния каждый атом окружён четырьмя такими же атомами, с которыми его связывают четыре валентных электрона. Соседние атомы кремния взаимодействуют друг с другом благодаря паре электронов, каждый из которых стал общим электроном двух атомов при образовании кристалла. Схематически на рисунке показано, что каждая пара электронов связана с двумя атомами, принадлежит двум атомам сразу.

ЗАПОМНИТЕ Взаимодействие атомов посредством электронных пар называется **ковалентной связью**.

Для удобства изобразим плоскую схему кристаллической решётки кремния, в которой валентные электроны показаны в виде точек на прямых от-

резках, соединяющих соседние атомы (рис. 8.28). При низких температурах практически все валентные электроны прочно связаны с атомами и поэтому не могут быть электронами проводимости.

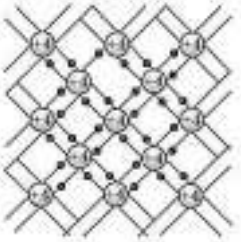


Рис. 8.28

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ При внешнем воздействии на кристалл — освещении его или нагревании — некоторые электроны приобретают энергию, достаточную для разрыва ковалентных связей. Такие электроны становятся свободными — электронами проводимости.

У того атома, от которого внешним воздействием электрон был переведён в свободное состояние, появилось вакантное место с недостающим электроном (рис. 8.29). Его называют дыркой. Дырка ведёт себя как положительно заряженная частица. Какой-либо из электронов соседних атомов может занять вакантное место, тогда дырка образуется в соседнем атоме. Такой процесс происходит многократно. Поэтому дырка блуждает по кристаллу.

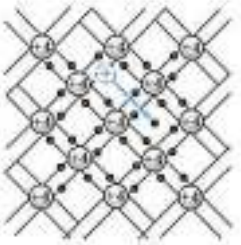


Рис. 8.29

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ При создании в полупроводнике электрического поля дырки движутся преимущественно в том направлении, куда двигались бы положительные заряды, а электроны — в противоположном направлении.

Не следует забывать, что, говоря о движении дырок, имеют в виду происходящее в действительности коллективное (эстафетное) перемещение от одного атома к другому электронов, но не свободных, а тех, которые осуществляют ковалентную связь.

ЗАПОМНИТЕ Проводимость, обусловленная движением свободных электронов и дырок в чистом полупроводниковом кристалле (без примесей), называется **собственной проводимостью** полупроводников.

При повышении температуры полупроводника число электронов проводимости, следовательно, и число дырок резко возрастает. Этим и объясняется уменьшение сопротивления полупроводника с повышением температуры.

К полупроводникам относят кристаллы, в которых для освобождения электрона требуется энергия не более 1,5—2 эВ. Кристаллы с бóльшими значениями энергии связи электронов с атомами относят к диэлектрикам.

Донорные и акцепторные примеси. Свойства полупроводников сильно зависят от содержания примесей.

ЗАПОМНИТЕ Проводимость, обусловленная наличием примесей в полупроводнике, называется **примесной проводимостью**.

Пусть, например, в кристалле кремния имеется примесь пятивалентных атомов мышьяка, которые замещают в узлах кристаллической решётки атомы кремния. Пятивалентный атом мышьяка вступает в ковалентные связи



Рис. 8.30

с четырьмя атомами кремния, а его пятый электрон оказывается свободным (не занятым в связях) (рис. 8.30).

Энергия, необходимая для разрыва связи пятого валентного электрона с атомом мышьяка в кристалле кремния, значительно меньше энергии, необходимой для отрыва электрона от атома кремния. Поэтому при комнатной температуре значительная часть атомов мышьяка лишается одного из своих электронов, и они становятся положительными ионами.

Положительный ион мышьяка не может захватить электрон у одного из соседних атомов кремния, так как энергия связи электронов с атомами кремния значительно превышает энергию связи пятого валентного электрона с атомом мышьяка. Поэтому эстафетного перемещения электронной вакансии не происходит, дырочной проводимости нет.

ЗАПОМНИТЕ Примеси, поставляющие электроны проводимости без возникновения равного им количества дырок, называются **донорными** (от лат. *donare* — давать, жертвовать).

В полупроводниковом кристалле, содержащем донорные примеси, электроны являются основными, но не единственными носителями тока, так как небольшая часть собственных атомов полупроводникового кристалла ионизована и в кристалле имеется небольшое количество дырок.

ЗАПОМНИТЕ Полупроводниковые кристаллы, в которых электроны служат основными носителями заряда, а дырки — неосновными, называются **электронными** полупроводниками или полупроводниками ***n*-типа** (от лат. *negativus* — отрицательный).

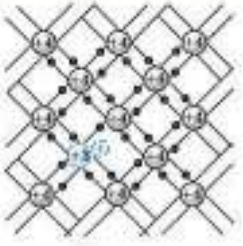


Рис. 8.31

При введении в кристалл кремния небольшой примеси трёхвалентного элемента, например индия, часть атомов кремния замещается этими атомами. Атом индия может осуществлять связь только с тремя соседними атомами, а связь с четвёртым атомом кремния оказывается незавершённой (рис. 8.31). Атом индия захватывает электрон у одного из соседних атомов кремния и становится неподвижным отрицательным ионом. Захват электрона от одного из атомов кремния приводит к возникновению дырки.

ЗАПОМНИТЕ Примеси, захватывающие электроны и создающие тем самым подвижные дырки, не увеличивая при этом числа электронов проводимости, называют **акцепторными** (от лат. *acceptor* — приёмщик).

При низких температурах основными носителями тока в полупроводниковом кристалле с акцепторной примесью являются дырки, а неосновными — электроны.

ЗАПОМНИТЕ Полупроводники, в которых концентрация дырок превышает концентрацию электронов проводимости, называют полупроводниками ***p*-типа** или **дырочными** полупроводниками (от лат. *positivus* — положительный).

Очень небольшое количество примеси пяти- или трёхвалентного вещества в кремнии приводит к резкому уменьшению его удельного электрического сопротивления. В 1 м^3 кремния содержится примерно 10^{28} атомов. Концентрация свободных электронов в чистом кремнии при комнатной температуре составляет $n = 10^{17}$ м$^{-3}$. Следовательно, на каждые сто миллиардов атомов кремния приходится один свободный электрон. Предположим, что всего 1 % атомов кремния замещён атомами мышьяка. В 1 % примеси мышьяка содержится 0,01 часть от 10^{28}, т. е. 10^{26} атомов в 1 м^3. Если считать, что каждый атом мышьяка даёт один электрон проводимости, то концентрация таких электронов, обусловленных примесью, составляет 10^{26} м$^{-3}$. Она в 10^9, т. е. в миллиард, раз больше, чем концентрация электронов в чистом кремнии. Во столько же раз соответственно уменьшается удельное сопротивление полупроводников.

Электрический ток в полупроводниках. Зависимость сопротивления полупроводников от температуры и от освещённости. Терморезисторы. Фоторезисторы. Примеси. Донорные и акцепторные примеси

1. Какие вещества называются полупроводниками? 2. Какой вид связи между атомами осуществляется в полупроводниковых кристаллах? 3. Что такое дырочная проводимость? 4. Атомы с какой валентностью могут быть донорными примесями? 5. Атомы с какой валентностью могут быть акцепторными примесями? 6. Какие носители заряда обеспечивают электрический ток в полупроводниках *n*-типа? 7. Какие носители заряда обеспечивают электрический ток в полупроводниках *p*-типа? 8. Как изменяется удельное электрическое сопротивление полупроводников: а) при нагревании; б) при освещении?

С помощью лабораторного оборудования соберите установку для исследования закона Ома для участка цепи (вы уже делали это после изучения материала § 72). В качестве объекта исследования возьмите полупроводниковый диод. Постройте график зависимости силы тока от напряжения на диоде и сравните его с графиком для резистора.

Использование полупроводников в технике.

§ 78. Односторонняя проводимость контактного слоя

Повторите: полупроводник.

***p—n*-Переход.** Самым удивительным свойством полупроводников оказалось свойство односторонней проводимости так называемого *p—n*-перехода — контакта двух полупроводниковых кристаллов различного типа проводимости.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Для образования *p—n*-перехода нужно создать в кристалле с дырочной проводимостью область с электронной проводимостью (или, наоборот, в кристалле с электронной проводимостью область с дырочной проводимостью).

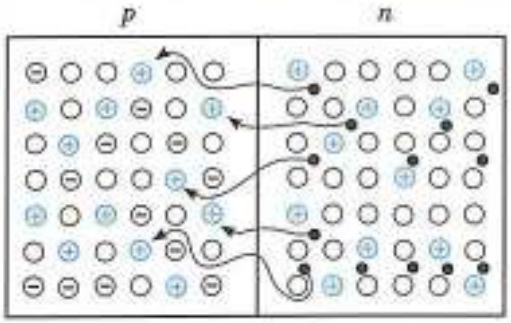


Рис. 8.32

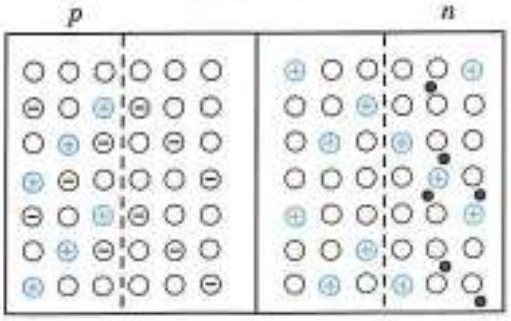


Рис. 8.33

Такую область создают путём введения примеси в процессе выращивания кристалла или путём введения атомов примеси в готовый кристалл. Через границу, разделяющую области кристалла с различными типами проводимости, происходит диффузия электронов и дырок (рис. 8.32).

Диффузия электронов из *n*-области в *p*-полупроводник приводит к появлению в электронном полупроводнике нескомпенсированных положительных ионов донорной примеси. В дырочном полупроводнике рекомбинация электронов с дырками приводит к появлению нескомпенсированных зарядов отрицательных ионов акцепторной примеси (рис. 8.33). Между двумя слоями объёмного заряда возникает электрическое поле. По мере накопления объёмного заряда напряжённость поля возрастает, и оно оказывает всё большее противодействие переходам электронов из *n*-полупроводника в *p*-полупроводник и соответственно дырок из *p*-полупроводника в *n*-полупроводник. Электронно-дырочный переход, или, сокращённо, *p—n*-переход, является границей, разделяющей области с дырочной (*p*) и электронной (*n*) проводимостями в одном и том же монокристалле.

ЗАПОМНИТЕ Пограничная область раздела полупроводников с различным типом проводимости называется **запирающим слоем**.

В связи с уходом свободных электронов и дырок запирающий слой практически превращается в слой диэлектрика.

Между областями с различным типом проводимости объёмные заряды ионов создают запирающее напряжение $U_з$; его значение для германиевых p—n-переходов равно примерно 0,35 В, для кремниевых — около 0,6 В.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Если p—n-переход соединить с источником тока так, чтобы с его положительным полюсом была соединена область с электронной проводимостью, то электроны в n-полупроводнике и дырки в p-полупроводнике удаляются внешним полем от запирающего слоя в разные стороны, увеличивая его толщину. Сопротивление p—n-перехода велико, сила тока мала и практически не зависит от напряжения. Этот способ включения p—n-перехода называется *включением в запирающем или в обратном направлении*.

Обратный ток в этом случае обусловлен собственной проводимостью полупроводниковых материалов, образующих p—n-переход, т. е. наличием небольшой концентрации свободных электронов в p-полупроводнике и дырок в n-полупроводнике. Этот ток очень мал.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ Если p—n-переход соединить с источником тока так, чтобы положительный полюс был соединён с областью с дырочной проводимостью, а отрицательный — с областью с электронной проводимостью, то переходы основных носителей через p—n-переход облегчаются. Двигаясь навстречу друг другу, основные носители входят в запирающий слой, уменьшая его сопротивление. Сила тока через p—n-переход в этом случае при напряжениях, превышающих $U_з$, ограничивается лишь сопротивлением внешней электрической цепи. Этот способ включения называется *включением в пропускном или в прямом направлении*.

ЗАПОМНИТЕ Способность p—n-перехода пропускать ток в одном направлении и практически не пропускать его в противоположном направлении используется в приборах, называемых **полупроводниковыми диодами**.

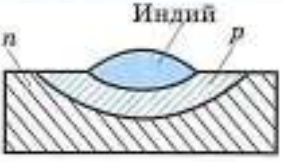


Рис. 8.34

Полупроводниковые диоды изготавливаются чаще всего из кристаллов кремния, в которых благодаря соответствующим примесям создаются соприкасающиеся между собой области с электронной и дырочной проводимостями. Если, например, на пластинку кремния с электронной проводимостью наплавить каплю индия (рис. 8.34), то поверхностный слой кремния, в который проникнут на некоторую глубину атомы индия, станет дырочным полупроводником. Тогда между областями кремния с электронной и дырочной проводимостями возникает p—n-переход.

На рисунке 8.35, *а* показано устройство одного из полупроводниковых диодов, на рисунке 8.35, *б* — его условное обозначение. Основная часть диода представляет собой пластинку кремния *1* с наплавленным индием *2*, которая помещена в металлический корпус. К кремнию и индию присоединены выводы *3* и *4*, изолированные от корпуса.

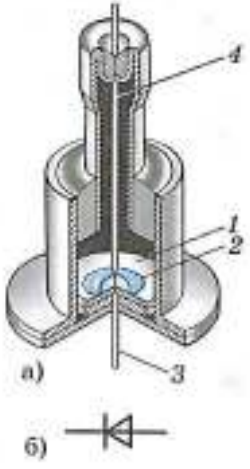


Рис. 8.35

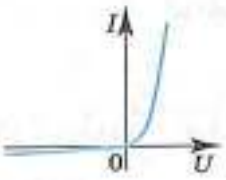


Рис. 8.36

Зависимость силы тока через полупроводниковый диод от напряжения, приложенного к нему, т. е. его вольт-амперная характеристика, показана на рисунке 8.36. Правая ветвь вольт-амперной характеристики соответствует пропускному направлению тока через диод (когда с возрастанием напряжения сила тока резко возрастает), а левая — запирающему.

Способность p—n-перехода пропускать ток практически только в одном направлении используется для преобразования с помощью диода переменного тока в постоянный (точнее, в пульсирующий) ток.

ЗАПОМНИТЕ Отношение значения прямого тока к значению обратного при напряжении 1 В называется **коэффициентом выпрямления**.

В хороших диодах коэффициент выпрямления — порядка 10^8.

Область рабочих напряжений полупроводникового диода ограничена со стороны малых напряжений из-за повышения сопротивления p—n-перехода с уменьшением прямого напряжения. Максимальное значение рабочего напряжения диода определяется напряжением пробоя p—n-перехода при обратном напряжении.

Преимуществами полупроводниковых диодов являются их малые размеры и масса, длительный срок службы, высокая механическая прочность, высокий коэффициент полезного действия. Существенный недостаток полупроводниковых диодов — зависимость их параметров от температуры. Полупроводниковые диоды не могут работать при температуре ниже −70 °С из-за возрастания удельного сопротивления полупроводниковых материалов с понижением температуры. При температурах выше 80 °С для германиевых и 125 °С для кремниевых диодов рабочие параметры резко ухудшаются из-за возрастания влияния собственной проводимости полупроводниковых материалов.

p—n-Переход. Дырки. Полупроводниковый диод. Коэффициент выпрямления

1. Что такое p—n-переход? 2. Почему при отсутствии внешнего электрического поля электроны не переходят через p—n-переход из n-полупроводника в p-полупроводник? 3. Почему p—n-переход обладает односторонней проводимостью? 4. В чём заключаются преимущества полупроводниковых диодов по сравнению с вакуумными диодами? 5. Какие недостатки присущи полупроводниковым диодам? 6. Почему полупроводниковый диод нельзя использовать для выпрямления тока при очень малых переменных напряжениях?

С помощью лабораторного оборудования соберите установку для исследования закона Ома для участка цепи. В качестве объекта исследования возьмите несколько разных полупроводниковых диодов. Для каждого из диодов постройте график зависимости силы тока от напряжения. Для каждого из диодов определите коэффициент выпрямления.

Применение полупроводниковых диодов в технике.

§ 79. Транзистор

Повторите: $p-n$-переход.

Устройство транзистора.

ЗАПОМНИТЕ **Транзистор** представляет собой полупроводниковое устройство с двумя $p-n$-переходами.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ С помощью соответствующих примесей в кристалле германия или кремния создают три области: между двумя областями *3* и *5* с проводимостью p-типа оставляют слой *2* с проводимостью n-типа, называемый *базой* (рис. 8.37). Одна из разделённых базой областей называется *эмиттером*, а другая — *коллектором*. Таким образом, между эмиттером и базой, а также коллектором и базой образуются два $p-n$-перехода *4* и *6*, пропускные направления которых противоположны.

На рисунке 8.38, *а* показано условное изображение транзистора $p-n-p$, а на рисунке 8.38, *б* — транзистора $n-p-n$.

Электроды *8* и *10* (см. рис. 8.37) — это выводы эмиттера и коллектора, электрод *9* — вывод базы, *7* — изоляторы, *1* — защитный кожух.

Включение транзистора в цепь. Транзистор соединяют с двумя источниками тока (рис. 8.39).

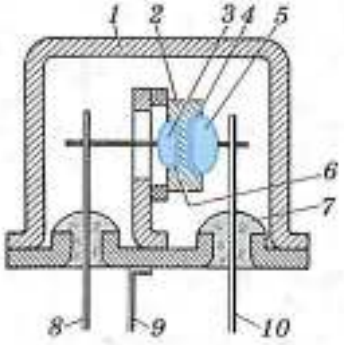


Рис. 8.37

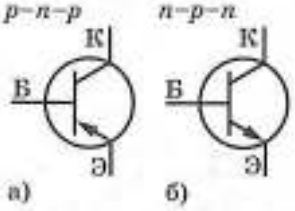


Рис. 8.38

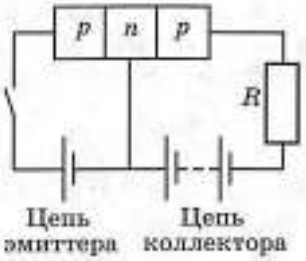


Рис. 8.39

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ При этом переход «эмиттер — база» включают в пропускном, а переход «коллектор — база» в запирающем направлении. Цепь, в которую включены эмиттер и база, называют *цепью эмиттера*, а цепь, в которую включены база и коллектор, называют *цепью коллектора*.

Пока цепь эмиттера разомкнута, в цепи коллектора ток очень мал, так как сопротивление этого $p-n$-перехода для основных носителей (электронов в базе и дырок в коллекторе) в запирающем направлении велико. Как только замыкают цепь эмиттера, дырки — основные носители заряда эмиттера — переходят из него в базу, вызывая ток в этой цепи. При этом значительная часть дырок проникает из базы в коллектор, так как для дырок —

неосновных носителей заряда базы — такой переход является пропускным, и они вызывают ток в цепи коллектора.

Усилительное действие транзистора. Сила тока в эмиттере и коллекторе почти одинакова, так как бóльшая часть дырок (до 95 %), попадающих из эмиттера в базу, переходит в коллектор (базу делают в виде очень тонкого слоя, который дырки легко пересекают, почти не рекомбинируя с электронами базы). Поэтому при изменении силы тока в цепи эмиттера одновременно почти во столько же раз изменяется сила тока в цепи коллектора. Эту особенность действия транзистора можно использовать для управления током в цепи коллектора. Для этого в цепь коллектора включают резистор с большим сопротивлением. Тогда небольшие изменения напряжения в цепи эмиттера могут вызывать значительные изменения напряжения на резисторе: при одинаковой силе тока в эмиттере и коллекторе напряжения на них пропорциональны сопротивлениям.

Применение полупроводниковых приборов в технике. Полупроводниковые приборы в настоящее время широко применяются в современной радиотехнике, автоматике, телемеханике и других областях науки и техники. На искусственных спутниках Земли и на межпланетных кораблях, на крышах домов и на электромобилях устанавливают полупроводниковые солнечные батареи, в которых электрический ток возникает за счёт энергии излучения Солнца.

Микроэлектроника. Новый раздел электроники — микроэлектроника — занимается разработкой интегральных микросхем и принципов их применения.

ЗАПОМНИТЕ **Интегральной микросхемой** называют совокупность большого числа взаимосвязанных компонентов — миниатюрных транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов, соединительных проводов, изготовленных в едином технологическом процессе на одном кристалле.

При изготовлении интегральной схемы на пластинку из полупроводникового материала наносят последовательно слои примесей, диэлектриков, напыляют слои металла. Для каждого нового слоя используется своя технология нанесения и свой рисунок расположения деталей. В результате на одном кристалле одновременно создаётся несколько тысяч транзисторов, конденсаторов, резисторов и диодов, соединённых проводниками в определённую схему.

Наиболее революционные изменения благодаря разработке микросхем произошли в области электронной вычислительной техники. Вместо ламповых ЭВМ, занимавших несколько этажей здания, созданы компьютеры на интегральных схемах, помещающиеся на столе.

Транзистор. База. Эмиттер. Коллектор. Интегральная микросхема

1. Как устроен транзистор? 2. Как включается транзистор в электрическую цепь? 3. На чём основана способность транзистора усиливать электрические сигналы?

1. Применение транзисторов в технике.
2. Солнечные батареи.

ОТВЕТЬТЕ НА ИТОГОВЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ

1. Опишите процессы, происходящие в металлах, электролитах и газах при прохождении электрического тока. Укажите для каждого из веществ, что является носителем тока в каждом случае.
2. Дайте определение удельного заряда электрона. Расскажите об опытах Милликена по определению удельного заряда электрона.
3. Опишите качественно зависимость тока в различных типах веществ от температуры.
4. Сформулируйте закон Фарадея.
5. Опишите условия возникновения электрического тока в газах. Составьте таблицу и сравните все типы разрядов в газе, укажите условия наблюдения каждого из них, проявления и особенности.
6. Расскажите об истории открытия электрона.
7. Дайте определение полупроводников, опишите их особенности. Сравните полупроводники с проводниками.
8. Охарактеризуйте поведение полупроводников при различных внешних воздействиях. Приведите примеры их применения в науке и технике.

1. Великие физические эксперименты в электродинамике. Опыты Кулона и Кавендиша. Опыты Фарадея. Опыты Ома. Опыты Эрстеда и Ампера. Опыты Био и Савара. Опыты Мандельштама и Папалекси. Опыты Перрена, Томсона и Милликена.

2. Сверхпроводимость. История открытия. Свойства сверхпроводников. Теории сверхпроводимости. Открытие высокотемпературной сверхпроводимости. Применение сверхпроводников.

ЕГЭ

А1. Все электроны, покидающие катод, ударяются в экран электронно-лучевой трубки. Как изменится сила тока, идущего в вакууме через трубку, если ускоряющее напряжение в трубке увеличить в 2 раза?

1) не изменится
2) увеличится примерно в 2 раза
3) увеличится примерно в 4 раза
4) увеличится примерно в $\sqrt{2}$ раза

А2. Источник тока присоединили к двум пластинам, опущенным в раствор поваренной соли. Сила тока в цепи равна 0,2 А. Какой заряд проходит между пластинами в ванне за 2 мин?

1) 0,4 Кл
2) 24 Кл
3) 10 Кл
4) 600 Кл

А3. p—n-Переход соединён с источником тока так, что к p-зоне присоединена отрицательная клемма источника. Если током основных носителей зарядов можно пренебречь, то ток

1) в p-зоне создаётся в основном движением дырок, а в n-зоне — движением электронов
2) в p-зоне и в n-зоне не идёт
3) в p-зоне создаётся в основном движением электронов, а в n-зоне — движением дырок
4) в p-зоне и в n-зоне создаётся в равной степени движением дырок и электронов

С4. Полупроводник p-типа получен добавлением трёхвалентного индия в четырёхвалентный германий. Число атомов индия составляет 0,01 % от числа атомов германия. Плотность германия 5400 кг/м^3. Определите примерную концентрацию носителей заряда в полученном полупроводнике. Собственной проводимостью германия можно пренебречь.

Лабораторные работы

№ 1. Измерение сил и ускорений

Оборудование: секундомер, измерительная лента, деревянный брусок, весы, разновес, нить, блок, чашка на подвесе.

Задание: рассчитайте ускорение бруска при действии на него силы 0,5 Н. Измерьте ускорение бруска под действием силы 0,5 Н и сравните с результатами расчёта.

Содержание и метод выполнения работы.

Сила в СИ является производной величиной, поэтому не существует эталона единицы силы, с которым можно было бы сравнивать другие силы.

Самый простой способ градуировки динамометра основан на использовании силы тяжести. Зная значение ускорения свободного падения g в данном месте и массу m тела, можно вычислить силу тяжести $F_т$, действующую на тело со стороны Земли.

Подвесив тело известной массы на крючок динамометра, можно отметить на шкале данное значение силы. Имея набор тел с различными массами, можно сделать ряд отметок на шкале динамометра.

Ускорение, как и сила, является производной физической величиной. Поэтому нет эталона ускорения, с которым можно было бы сравнивать ускорения тел. Ускорения тел можно определять путём измерения других физических величин, связанных с ускорением. Динамический способ измерения ускорения основан на измерении силы, вызывающей ускорение тела известной массы. Кинематический способ измерения ускорения при равноускоренном движении может быть основан на измерении изменения скорости за данный промежуток времени или пройденного пути за это время.

Порядок выполнения работы.

1. Измерьте массу бруска с помощью весов. Вычислите ускорение $a_т$, с которым будет двигаться брусок под действием силы 0,5 Н.

2. Привяжите к крючку на бруске нить. Укрепите на краю стола блок. Пропустите нить через блок и привяжите к её концу чашку на подвесе (рис. Л.1). Нить должна быть параллельна горизонтальной поверхности стола.

3. Используя разновес, подберите такой груз в чашке на подвесе, который обеспечил бы силу натяжения нити, равную по модулю силе трения бруска о поверхность стола. После мягкого толчка груз должен двигаться равномерно по поверхности стола.

4. Установите брусок на противоположном от блока краю стола. Измерьте расстояние от бруска до блока. Удерживая брусок, положите на чашку дополнительный груз массой 0,05 кг. Отпустите брусок и в тот же момент запустите секундомер.

В момент столкновения бруска с блоком остановите секундомер. Запишите показания секундомера.

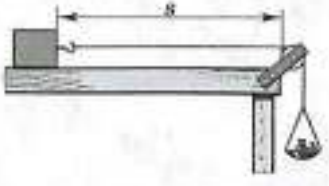


Рис. Л.1

5. По измеренным значениям пути и времени вычислите ускорение a_3.

6. Оцените границы погрешностей измерений ускорения в обоих опытах и определите, согласуются ли эти значения ускорения. Результаты измерений и вычислений занесите в отчётную таблицу.

Дополнительное задание: сделайте более точный расчёт ускорения бруска под действием груза массой 0,05 кг, положенного на чашку. Для этого учтите, что при ускоренном движении системы брусок — груз сила натяжения не равна силе тяжести, действующей на груз.

Отчётная таблица

m, кг	F, Н	$a_т$, м/с^2	Δm, кг	ε_m	$\varepsilon_{aт}$	$\Delta a_т$, м/с^2	s, м	t, с	$a_э$, м/с^2	Δs, м	ε_s	Δt, с	ε_t	$\varepsilon_{aэ}$	$\Delta a_э$, м/с^2

№ 2. Измерение импульса

Оборудование: наклонная плоскость, полоса бумаги, линейка измерительная, монеты разного достоинства.

Задание: определите импульс массивной монеты после её скольжения по наклонной плоскости. Поставьте на пути массивной монеты более лёгкую и проанализируйте результат их взаимодействия. Сравните импульс системы из двух монет до столкновения с импульсом этой системы после столкновения монет.

Содержание и метод выполнения работы.

В специальных измерениях импульса тела нет необходимости, если известны его масса и скорость. В этом случае импульс определяется как их произведение. Однако в физике довольно часто встречаются случаи, когда прямые измерения массы и скорости тела оказываются затруднёнными или невозможными, но сведения о них можно получить на основании измерений импульса тела. Такая ситуация характерна для многих экспериментов в области ядерной физики и физики элементарных частиц, в которых обнаруживаются новые частицы с неизвестной массой. Измерив импульс и кинетическую энергию частицы, можно определить затем её массу и скорость.

Измерение импульса тела с неизвестной массой, движущегося с неизвестной скоростью, возможно на основании закона сохранения импульса.

В данной работе исследуется суммарный импульс системы из двух монет до и после их соударения. При этом импульсы сравниваются векторно в случае нецентрального удара. Для этой цели одна из монет соскальзывает с наклонной плоскости и затем сталкивается с неподвижной монетой. Так как массы монет известны, то для вычисления их импульсов нужно определить их скорости. Они вычисляются по длине тормозного пути и измеренному коэффициенту трения монеты о бумагу.

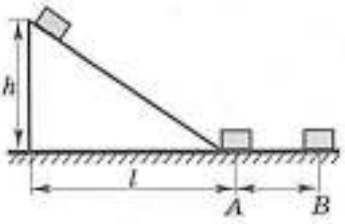


Рис. Л.2

Предоставим монете возможность после соскальзывания с наклонной плоскости двигаться по бумаге на горизонтальной поверхности стола до остановки. Измерим тормозной путь, пройденный монетой по горизонтальной поверхности от точки A — положения центра монеты в начале пути — до точки остановки B (рис. Л.2). Как легко доказать, скорость монеты в точке A равна:

$$v = \sqrt{2\mu g s}. \qquad (1)$$

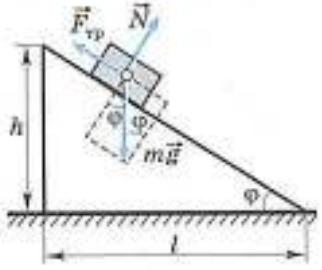


Рис. Л.3

Если поверхности наклонной и горизонтальной плоскостей изготовлены из одного и того же материала, то им соответствует один и тот же коэффициент трения:

$$\mu = h/(l + s). \qquad (2)$$

Для вывода этой формулы воспользуйтесь рисунками Л.2 и Л.3.

На основе этих данных можно найти значение модуля импульса p монеты до столкновения.

Так как вторая монета до столкновения находится в покое, импульс первой монеты до столкновения равен импульсу системы из двух монет после столкновения:

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2. \qquad (3)$$

Порядок выполнения работы.

1. Положите на наклонную плоскость полосу бумаги таким образом, чтобы часть её (длиной 25—30 см) находилась на горизонтальной поверхности стола.

Монета, лежащая на поверхности бумажной полосы на наклонной плоскости, должна плавно соскальзывать по ней и двигаться по горизонтальной поверхности до остановки. Подберите такие угол наклона плоскости и начальное положение запуска монеты, чтобы путь монеты на горизонтальной поверхности составлял 15—25 см.

2. Отметьте начальное положение монеты на наклонной плоскости и её конечное положение на горизонтальной плоскости. Проведите на горизонтально расположенном участке бумажной полосы прямую, по которой двигался центр диска монеты. Отметьте положение центра монеты в начале горизонтального участка пути (точка A) и в его конце (точка B). Измерьте тормозной путь $s = AB$ (отрезок AB) (рис. Л.4).

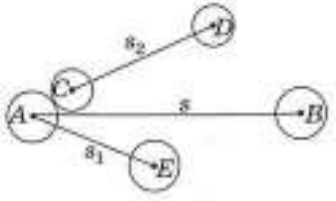


Рис. Л.4

3. Измерьте длины катетов h и l. По формуле (2) определите коэффициент трения монеты о бумагу. Найдите среднее значение коэффициента трения и погрешность.

Зная коэффициент трения, определите скорость монеты в точке A по формуле

$$v = \sqrt{2\mu g s} = \sqrt{2ghs/(l + s)}.$$

Телом массой m_1 может служить монета массой 5—6 г, телом меньшей массы m_2 — монета массой 3—4 г.

4. Поставьте на пути движения первой монеты вторую таким образом, чтобы столкновение произошло в тот момент, когда центр диска первой монеты проходит через точку A. Удар должен быть нецентральным (см. рис. Л.4).

Отметьте начальное положение центра диска второй монеты (точка C на рис. Л.4). Запустите первую монету с того же места на наклонной плоскости, как и в первом опыте. Отметьте конечное положение центров дисков первой (точка E) и второй (точка D) монет (см. рис. Л.4). Соедините точки A и E отрезком AE, точки C и D отрезком CD. Измерьте расстояния s_1 и s_2.

5. По известным значениям масс монет m_1 и m_2, тормозных путей s, s_1, s_2 и коэффициента трения μ вычислите значения скоростей v, v_1 и v_2 монет и модулей их импульсов p, p_1 и p_2.

6. Отложите на прямых, проходящих через точки A и B, A и E, C и D, отрезки, пропорциональные модулям импульсов монет. Постройте векторы $\vec{p}$, $\vec{p}_1$, $\vec{p}_2$ (рис. Л.5). Проверьте, выполняется ли условие

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2.$$

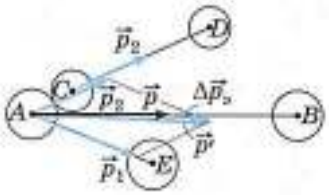


Рис. Л.5

7. Постройте вектор $\vec{p}' = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$, перенеся начало вектора $\vec{p}_2$ в точку A. Найдите разность векторов $\Delta\vec{p}_3 = \vec{p}' + \vec{p}$. Измерьте длину вектора $\Delta\vec{p}_3$ и по известному масштабу построения векторов импульса определите значение модуля вектора $\Delta\vec{p}_3$.

8. Определите границы погрешностей значений импульсов системы из двух монет до и после столкновения. Проверьте, лежит ли обнаруженное различие импульсов Δp_3 в пределах границ погрешностей измерений. Результаты измерений и вычислений занесите в отчётную таблицу.

Отчётная таблица

s, м	s_1, м	s_2, м	h, см	l, см	p, кг · м/с	p_1, кг · м/с	p_2, кг · м/с	p', кг · м/с	Δp_3, кг · м/с	μ	ε_p	$\Delta p_{3\,\text{сл}}$, кг · м/с

Указание. При оценке границ погрешностей измерений в данном эксперименте необходимо обратить внимание на то, что при повторном запуске монеты из одного и того же места на наклонной плоскости пройденный путь по горизонтальной поверхности может заметно отличаться от первого результата. Различие результатов повторных опытов свидетельствует о существенном влиянии случайных факторов на результаты эксперимента. Такими факторами могут быть действие пальцев экспериментатора при запуске монеты, неровность поверхности бумаги и многое другое. Граница абсолютной систематической погрешности измерений пройденного пути имеет в данном эксперименте значение около 1 мм. Это значительно меньше наблюдаемых случайных

отклонений, поэтому систематическими погрешностями измерений в данном случае можно пренебречь.

Для оценки границ случайных погрешностей можно выполнить серию из 10 измерений тормозного пути при одинаковых условиях запуска монеты, найти среднее арифметическое значение тормозного пути $s_{ср}$ и среднюю квадратичную погрешность.

Границы абсолютных погрешностей измерений пути s_1 и s_2 можно считать приблизительно равными границе абсолютной погрешности измерения первого тормозного пути: $\Delta s_1 = \Delta s_2 = \Delta s$.

Считая, что погрешности измерений массы и коэффициента трения пренебрежимо малы по сравнению со случайными погрешностями измерений пройденного пути, определите границу относительной погрешности измерения импульса.

Дополнительные задания: 1. Вычислите значения кинетической энергии системы из двух монет до столкновения и после столкновения и найдите их разность. Оцените границу погрешности измерения кинетической энергии и сделайте вывод, является ли процесс столкновения монет упругим ударом.

2. Оцените погрешность измерения коэффициента трения, для чего пять раз определите тангенс предельного угла трения.

3. Проведите опыт с двумя одинаковыми монетами. Проверьте, выполнится ли известный из теории результат, что при упругом нецентральном ударе двух тел с одинаковой массой, из которых одно покоится, тела после удара разлетаются под прямым углом.

№ 3. Измерение момента инерции тела

Оборудование: металлическое кольцо, весы, набор гирь, штангенциркуль, измерительная лента, секундомер, уровень, гладкая доска длиной около 1 м, полосы картона.

Задание: рассчитайте теоретически момент инерции кольца относительно оси вращения, проходящей через центр кольца перпендикулярно его плоскости, измерив массу кольца и его внутренний и внешний радиусы. Затем проведите опыт с наклонной плоскостью и определите на основе измерений момент инерции этого же кольца. Сравните полученные значения моментов инерции.

Содержание и метод выполнения работы.

Момент инерции кольца с внутренним радиусом r и внешним радиусом R можно рассчитать теоретически с помощью выражения для кинетической энергии вращающегося тела. Цилиндр радиусом R можно представить состоящим из двух тел: цилиндра радиусом r и кольца с внутренним радиусом r и внешним радиусом R. Очевидно, что при вращении большого цилиндра с угловой скоростью ω его кинетическая энергия равна сумме кинетических энергий малого цилиндра и кольца:

$$\frac{I_1\omega^2}{2} = \frac{I_2\omega^2}{2} + \frac{I_{к.т}\omega^2}{2}, \qquad (1)$$

где I_1 — момент инерции большого цилиндра; I_2 — момент инерции малого цилиндра; $I_{к.т}$ — момент инерции кольца. Из уравнения (1) следует:

$$I_{к.т} = I_1 - I_2 = \frac{m_1R^2}{2} - \frac{m_2r^2}{2}. \qquad (2)$$

Массы m_1 и m_2 цилиндров можно выразить через плотность ρ вещества, их длину l и радиусы R и r:

$$m_1 = \pi R^2 l\rho, \qquad (3)$$

$$m_2 = \pi r^2 l\rho. \qquad (4)$$

Плотность ρ вещества можно найти по известным значениям массы m кольца и его объёма $V = \pi l(R^2 - r^2)$:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\pi l(R^2 - r^2)}. \qquad (5)$$

Из уравнения (2) с учётом выражений (3)—(5) следует:

$$I_{к.т} = \frac{\pi\rho l(R^4 - r^4)}{2} = \frac{m(R^2 + r^2)}{2}. \qquad (6)$$

Таким образом, измерив массу кольца и его внешний и внутренний радиусы, мы можем вычислить его момент инерции относительно оси, проходящей через центр кольца перпендикулярно его плоскости.

Для экспериментального определения момента инерции кольца можно провести следующий опыт. Установим гладкую доску длиной l под углом α к горизонту (рис. Л.6). Поставим кольцо на верхний край доски и измерим время t его скатывания. По закону сохранения энергии имеем

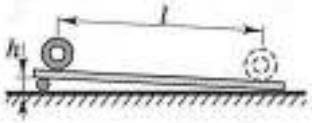


Рис. Л.6

$$\frac{I_{к.э}\omega^2}{2} + \frac{mv^2}{2} - mgh = mgl\sin\alpha. \qquad (7)$$

Но $\omega = v/R$, а конечная скорость $v = 2l/t$. Подставив ω и v в уравнение (7), после несложных преобразований получим

$$I_{к.э} = mR^2\left(\frac{gt^2\sin\alpha}{2l} - 1\right). \qquad (8)$$

Таким образом, для экспериментального определения момента инерции кольца необходимо измерить его массу, внешний радиус, время скатывания по наклонной плоскости, длину наклонной плоскости и угол её наклона. Если высота подставки под наклонной плоскостью равна h, то $\sin\alpha = h/l$ и выражение (8) примет вид

$$I_{к.э} = mR^2\left(\frac{ght^2}{2l^2} - 1\right). \qquad (9)$$

Порядок выполнения работы.

1. Подготовьте весы для взвешивания и определите массу кольца. С помощью штангенциркуля определите внутренний и внешний радиусы кольца. Вычислите момент инерции по формуле (6).

2. Положите доску на стол и проверьте горизонтальность её поверхности с помощью уровня или металлического шара. Если поверхность доски на столе не горизонтальна, то добейтесь горизонтального положения поверхности доски, подкладывая под один из её концов полосы картона.

После этого подложите под другой конец доски карандаш или книгу и подберите такой угол наклона доски, при котором кольцо будет скатываться за 3—4 с.

3. Поставьте кольцо у верхнего края наклонной плоскости и отпустите его одновременно с запуском секундомера. При достижении кольцом края доски остановите секундомер. Запишите показания секундомера.

4. Измерьте длину доски и высоту подставки под её верхним концом. Вычислите момент инерции кольца по формуле (9).

5. Оцените границы погрешностей измерений и вычислений момента инерции кольца. Согласуются ли результаты расчёта момента инерции по формуле (6) и результаты его экспериментального определения с применением формулы (9)?

Результаты измерений и вычислений занесите в отчётную таблицу.

Границы погрешностей измерений момента инерции при использовании формулы (6) можно оценить следующим образом:

$$\varepsilon_{I_T} = \varepsilon_m + \varepsilon_{R^2+r^2} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta(R^2+r^2)}{R^2+r^2}.$$

Абсолютная погрешность суммы квадратов радиусов имеет вид

$$\Delta(R^2 + r^2) = \Delta(R^2) + \Delta(r^2) = 2R\Delta R + 2r\Delta r.$$

Пренебрегая погрешностью при измерении массы, получаем

$$\varepsilon_{I_T} \approx \frac{2(R\Delta R + r\Delta r)}{R^2+r^2}.$$

Приняв границу абсолютной погрешности измерения с помощью штангенциркуля равной $\Delta r = \Delta R = \delta = 0{,}1$ мм, получим

$$\varepsilon_{I_T} = \frac{2\delta(R+r)}{R^2+r^2}. \qquad (10)$$

Границы погрешностей измерений при вычислении момента инерции по формуле (9) можно оценить следующим образом:

$$\varepsilon_{I_Э} = \varepsilon_m + \varepsilon_{R^2} + \varepsilon_{k-1}, \text{ где } k = \frac{ght^2}{2l^2}.$$

Пренебрегая, как и прежде, погрешностью при измерении массы, получаем

$$\varepsilon_{I_Э} \approx \frac{2\Delta R}{R} + \frac{\Delta(k-1)}{k-1} = \frac{2\Delta R}{R} + \frac{\Delta k}{k-1}. \qquad (11)$$

Но

$$\Delta k = k\varepsilon_k = k\left(\frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta h}{h} + \frac{2\Delta t}{t} + \frac{2\Delta l}{l}\right) = \frac{ght^2}{2l^2}\left(\frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta h}{h} + \frac{2\Delta t}{t} + \frac{2\Delta l}{l}\right). \quad (12)$$

Очевидно, что эту погрешность имеет смысл вычислить отдельно и затем уже подставить результат в выражение (11). Приняв $g = 9{,}81$ м/с^2, можно погрешностью $\frac{\Delta g}{g} \approx 0{,}04\,\%$ пренебречь, что упростит расчёт.

Граница абсолютной погрешности измерения времени Δt складывается из границы инструментальной погрешности $\Delta t_{пр}$, границы погрешности метода измерения $\Delta t_м$ и границы погрешности отсчёта $\Delta t_{отсч}$: $\Delta t = \Delta t_{пр} + \Delta t_м + \Delta t_{отсч}$.

Границу инструментальной погрешности механического секундомера можно принять равной 0,1 с, примерно такие же значения имеют границы погрешностей отсчёта и метода измерений, обусловленных ошибкой наблюдателя при запуске или остановке секундомера. Поэтому можно считать, что $\Delta t \approx 0{,}3$ с.

Границу абсолютной погрешности измерения высоты наклонной плоскости из-за малости измеряемого значения высоты можно считать приблизительно равной погрешности отсчёта при измерении линейкой ($\Delta h = 1$ мм), а границу абсолютной погрешности измерения длины доски можно считать равной сумме границ инструментальной погрешности и погрешности отсчёта:

$$\Delta l = \Delta l_{пр} + \Delta l_{отсч} = 1 \text{ см} + 0{,}5 \text{ см} = 1{,}5 \text{ см}.$$

Дополнительное задание: выведите формулу (9) для вычисления момента инерции кольца на основании второго закона Ньютона для поступательного и вращательного движения кольца.

Отчётная таблица

m, кг	R, м	r, м	$I_{к.т}$, кг · м^2	$\varepsilon_{I_т}$	l, м	h, м	t, с	$I_{к.э}$, кг · м^2	$\varepsilon_{I_э}$

№ 4. Измерение давления газа

Оборудование: насос, работающий на разрежение, стеклянная бутылка с резиновой пробкой, стеклянная трубка длиной 40—60 см, закрытая с одного конца, сосуд с водой, линейка измерительная, резиновый шланг, зажим, манометр.

Задание: откачайте воздух из бутылки насосом. Измерьте давление воздуха в бутылке с помощью стеклянной трубки и сосуда с водой. Полученный результат проверьте прямым измерением давления воздуха с помощью манометра.

Содержание и метод выполнения работы.

Для измерения разности давлений можно применить, например, трубчатый манометр. В этом приборе чувствительным элементом, соединяющимся с исследуемым объёмом, является изогнутая трубка. При различии давлений изнутри и снаружи трубка деформируется и вызывает через исполнительное устройство поворот стрелки прибора.

Разность Δp давления p газа в каком-то сосуде и атмосферного давления p_a можно измерить и с помощью жидкостного манометра, который состоит из двух вертикальных стеклянных трубок, соединённых внизу и открытых сверху. Трубки манометра заполняются жидкостью примерно до половины высоты. При одинаковом внешнем давлении на обе поверхности жидкости в двух коленах манометра уровни жидкости в них находятся на одинаковой высоте. Если же одну стеклянную трубку манометра соединить резиновым шлангом с сосудом, в котором газ находится под давлением p, отличным от давления p_a атмосферного воздуха, то уровни жидкости в трубках манометра окажутся расположенными на разной высоте. Разность h уровней жидкости в трубках манометра связана с разностью давлений на поверхности жидкости в них уравнением $\Delta p = p - p_a = \rho g h$.

Если трубки манометра заполнены водой, то разность давлений в паскалях можно вычислить по разности уровней воды в сантиметрах. Если $h = 1$ см, то $\Delta p = 10^3$ кг/м$^3 \cdot 9{,}81$ м/с$^2 \cdot 10^{-2}$ м ≈ 100 Па, т. е. 1 см вод. ст. ≈ 100 Па.

При отсутствии приборов для измерения давления можно воспользоваться стеклянной трубкой, закрытой с одного конца. Для этого следует соединить эту трубку с сосудом, в котором нужно измерить давление газа, затем перекрыть соединительный резиновый шланг зажимом. Сняв конец резинового шланга с трубки в пробке сосуда, следует поместить конец стеклянной трубки вместе со шлангом в воду и под водой снять конец шланга со стеклянной трубки. Так как начальное давление воздуха внутри трубки ниже атмосферного, вода войдёт в неё и поднимется на некоторую высоту h, при которой давление воздуха в трубке станет равным атмосферному. Процесс сжатия газа можно считать изотермическим, поэтому начальное давление в трубке, равное давлению в бутылке, определяется по закону Бойля—Мариотта:

$$p_1 = \frac{p_2 V_2}{V_1} = \frac{p_2 l_2}{l_1}, \qquad (1)$$

где p_1 — начальное давление воздуха в трубке (т. е. давление в бутылке); V_1 — начальный объём; p_2 — конечное давление воздуха; V_2 — его конечный объём в трубке после подъёма воды.

Конечное давление p_2 воздуха в трубке равно атмосферному давлению p_a воздуха минус давление p_3 водяного столба в трубке над поверхностью жидкости. Если этой поправкой можно пренебречь, то давление p_2 равно атмосферному давлению. Тогда для давления p_1 имеем

$$p_1 = \frac{p_a l_2}{l_1}. \qquad (2)$$

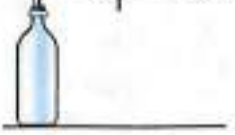


Рис. Л.7

Порядок выполнения работы.

1. Измерьте длину l_1 стеклянной трубки.

2. Соедините резиновым шлангом насос на разрежение с трубкой в пробке сосуда (рис. Л.7). Сделайте 20 движений поршня насоса. Перекройте шланг зажимом.

3. Снимите конец шланга со штуцера насоса и присоедините его к открытому концу стеклянной трубки. Откройте зажим на шланге и снова перекройте его (рис. Л.8).



Рис. Л.8

4. Опустите конец стеклянной трубки вместе со шлангом под воду и снимите шланг. Поставьте стеклянную трубку вертикально и измерьте длину l_2 воздушного столба (рис. Л.9).

5. Определите атмосферное давление p_a воздуха по показаниям барометра. Используя найденные значения длин l_1 и l_2 воздушного столба в стеклянной трубке и атмосферного давления p_a, вычислите давление p_1 в сосуде и трубке по формуле (2).

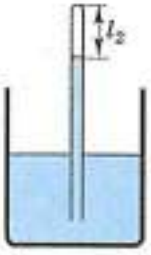


Рис. Л.9

6. Оцените границы погрешностей измерений. Результаты измерений и вычислений занесите в отчётную таблицу.

Границы погрешностей измерений можно оценить следующим образом. Из уравнения (2) следует:

$$\varepsilon_{p1} = \varepsilon_{l2} + \varepsilon_{l1} + \varepsilon_{pa}.$$

При измерениях длины воздушного столба линейкой с миллиметровыми делениями границу абсолютной погрешности измерений длины $\Delta l = \Delta l_1 - \Delta l_2$ можно считать равной сумме границ инструментальной погрешности и погрешности отсчёта, каждая из которых равна примерно 1 мм: $\Delta l_1 - \Delta l_2 = \Delta l_{ир} + \Delta l_{отсч} \approx 2$ мм.

Границу абсолютной погрешности измерения атмосферного давления p_a можно принять равной цене одного деления шкалы барометра. (Учтите, что показания барометра часто заданы не в паскалях, а в миллиметрах ртутного столба. При расчётах следует учесть, что давление 1 мм рт. ст. равно 133,3 Па.)

Дополнительные задания: 1. Выведите соотношение между 1 мм рт. ст. и 1 Па.

2. Как учесть погрешность, вносимую в измерение давления воздуха в бутылке, когда к ней присоединяются трубка и резиновый шланг?

Отчётная таблица

l_1, м	l_2, м	p_a, Па	Δp_a, Па	p_1, Па	ε_p	Δp_1, Па

№ 5. Измерение поверхностного натяжения

Оборудование: капиллярная трубка, штангенциркуль, стальная или пластмассовая линейка с миллиметровыми делениями, прозрачный стакан с дистиллированной водой.

Задание: понаблюдайте подъём уровня воды в капилляре и по высоте подъёма вычислите поверхностное натяжение воды.

Содержание и метод выполнения работы.

Высота подъёма смачивающей жидкости в капилляре определяется поверхностным натяжением σ, плотностью ρ жидкости и радиусом r капилляра: $h = \frac{2\sigma}{\rho g r} = \frac{4\sigma}{\rho g D}$, где g — ускорение свободного падения; D — диаметр капилляра.

Из этого выражения следует, что для определения поверхностного натяжения смачивающей жидкости необходимо измерить высоту подъёма жидкости известной плотности в капилляре известного радиуса.



Рис. Л.10

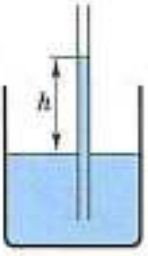


Рис. Л.11

Для измерения диаметра капилляра можно воспользоваться металлической иглой. Вдвинув иглу в капилляр до упора, можно пометить краской границу соприкосновения иглы с капилляром (рис. Л.10). Диаметр иглы на уровне этой границы можно принять за диаметр капилляра и измерить его с помощью штангенциркуля (лучше микрометра). Подъём дистиллированной воды в капилляре можно понаблюдать, опустив капилляр в воду (рис. Л.11). Капиллярная трубка должна быть предварительно обезжирена и промыта дистиллированной водой.

Порядок выполнения работы.

1. Измерьте радиус капилляра с помощью иглы и штангенциркуля (или микрометра).
2. Опустите конец капиллярной трубки в воду и измерьте высоту подъёма воды.
3. Вычислите поверхностное натяжение воды. Результаты измерений и вычислений занесите в отчётную таблицу.
4. Оцените границы погрешностей измерений, приняв $\Delta h = 0{,}5$ мм и $\Delta r = 0{,}1$ мм.

Дополнительное задание: добавьте в воду немного мыла и измерьте поверхностное натяжение мыльного раствора.

Отчётная таблица

h, м	ρ, кг/м^3	D, м	σ, Н/м	ε_σ	$\Delta\sigma$, Н/м

№ 6. Наблюдение процесса роста кристаллов из раствора

Оборудование: микроскоп школьный с 80-кратным увеличением, насыщенные растворы хлорида натрия, хлорида аммония, гипосульфита, предметные стёкла, стеклянные палочки.

Задание: пронаблюдайте процесс роста кристаллов различных веществ в пересыщенном водном растворе.

Содержание и метод выполнения работы.

Для получения пересыщенного водного раствора любого вещества необходимо создать условия для испарения воды соответствующего насыщенного раствора. Для этого, например, можно небольшое количество насыщенного раствора поместить на обезжиренную стеклянную пластину. Капля растекается по стеклу тонким слоем, вода быстро испаряется, раствор становится пересыщенным, начинается интенсивный процесс кристаллизации.

Для растворов некоторых веществ степень пересыщения при этом так велика, что образуются необычные для данного вещества ветвистые древовидные формы, называемые дендритами. Рост дендритов происходит следующим образом. Вершина кристалла соприкасается с раствором большей концентрации, чем боковые грани растущего кристалла. За счёт этого создаются условия для более интенсивного роста вершины кристалла, она быстрее внедряется в пересыщенный раствор и обгоняет рост боковых граней.

Порядок выполнения работы.

1. Поместите на столик микроскопа предметное стекло (рис. Л.12, *а*), не дотрагиваясь до его поверхности. Отрегулируйте освещение и добейтесь чёткого изображения верхней поверхности предметного стекла. Наведение на резкость можно облегчить нанесением на верхнюю поверхность стекла метки карандашом или чернилами.

Внимание! При наведении на резкость вращение микрометрического винта микроскопа следует производить осторожно! Наблюдая сбоку, тубус микроскопа необходимо сначала опустить, не доводя его до соприкосновения с предметным стеклом, а затем, наблюдая в окуляр, осторожно перемещать вверх до получения чёткого изображения.



Рис. Л.12

Примечание. В последнее время в школы поступают цифровые микроскопы, которые дают дополнительные возможности при проведении лабораторных работ. Так, с помощью цифрового микроскопа, представленного на рисунке Л.12, *б*, можно не только наблюдать процесс зарождения и роста кристаллов, но и сделать фото- и видеосъёмку.

2. Выньте предметное стекло, нанесите на него с помощью стеклянной палочки каплю насыщенного раствора хлорида аммония. Палочкой распределите каплю по стеклу.

3. Поместите стекло с каплей под объектив микроскопа так, чтобы в поле зрения находился край капли, так как первые кристаллы образуются обычно на её краю.

4. Пронаблюдайте процесс зарождения и роста кристаллов.

5. Результаты наблюдений занесите в отчёт, который должен содержать краткое описание процесса роста кристаллов и зарисовку картины, видимой в микроскоп.

6. Пронаблюдайте аналогичные процессы с другими растворами.

№ 7. Измерение удельной теплоты плавления льда

Оборудование: калориметр, термометр, цилиндр измерительный, сосуд с тёплой водой, сосуд с водой и тающим льдом.

Задание: определите удельную теплоту плавления льда. (Удельная теплоёмкость c воды равна 4,18 кДж/(кг · К).)

Содержание и метод выполнения работы.

Определение отданного или полученного количества теплоты на основании измерений температуры требует осуществления теплообмена между двумя или более телами без совершения работы. Обычно для таких измерений используется калориметр.

Калориметр представляет собой два цилиндрических сосуда, радиус одного из них немного больше радиуса другого. Сосуд меньших размеров ставится внутрь второго на теплоизолирующую подставку. Между стенками сосудов находится воздух, являющийся хорошим теплоизолятором.

Во внутренний сосуд наливается жидкость, например керосин или вода. Если в жидкость опустить тело с температурой t_1, которая выше температуры t_2 жидкости и калориметра, то между жидкостью и телом происходит теплообмен до установления теплового равновесия. При теплоизоляции от внешних тел и равенстве нулю работы внешних сил внутренняя энергия тел в калориметре в сумме не изменяется, следовательно, сумма количества теплоты Q_1, полученной исследуемым телом, количества теплоты Q_2, полученной жидкостью, и количества теплоты Q_3, полученной внутренним сосудом калориметра, равна нулю. На этом основании составляется уравнение теплового баланса.

Порядок выполнения работы.

1. Разбейте лёд на кусочки небольших размеров и оставьте в чашке на 20—30 мин. Лёд в воде в процессе таяния имеет температуру t_1, равную 0 °С.

2. Налейте в измерительный цилиндр 150 см^3 тёплой воды при температуре примерно 40 °С. Измерьте температуру t_3 тёплой воды в цилиндре и перелейте эту воду во внутренний стакан калориметра. Измерьте температуру t_2 воздуха.

3. Куски тающего льда опускайте в калориметр с тёплой водой. После опускания каждого куска льда ожидайте полного его расплавления и следите за показаниями термометра. Лёд нужно добавлять до тех пор, пока температура воды в калориметре не опустится до значения t_2, равного температуре окружающего воздуха.

В этом случае начальная и конечная температуры стакана калориметра одинаковы, стакан не получает и не отдаёт теплоту. Следовательно, в уравне-

ние теплового баланса входят только количество теплоты, идущей на плавление льда: $Q_1 = \lambda m_1$, количество теплоты, идущей на нагревание воды, образовавшейся в результате таяния льда: $Q_2 = m_1 c(t_2 - t_1)$, и количество теплоты, выделяющейся при остывании тёплой воды: $Q_3 = m_2 c(t_2 - t_3)$.

Уравнение теплового баланса имеет вид

$$m_1\lambda + m_1 c(t_2 - t_1) + m_2 c(t_2 - t_3) = 0,$$

где c — удельная теплоёмкость воды; m_1 — масса льда; m_2 — масса тёплой воды.

Массу льда можно определить, перелив в измерительный цилиндр воду из калориметра после завершения эксперимента. Объём воды, образовавшейся в результате таяния льда, равен разности объёмов всей воды и тёплой воды: $V_1 = V_2 - V_3$. Масса льда равна $m_1 = V_1\rho$.

4. Вычислите удельную теплоту плавления льда по формуле

$$\lambda = \frac{m_2 c(t_3 - t_2) - m_1 c(t_2 - t_1)}{m_1}.$$

5. Оцените границы погрешностей измерений и вычислений. Результаты измерений и вычислений занесите в отчётную таблицу.

Отчётная таблица

V_1, м³	V_2, м³	V_3, м³	m_1, кг	m_2, кг	t_1, °C	t_2, °C	t_3, °C	λ, Дж/кг	$\Delta\lambda$, Дж/кг

Расчёт погрешности: $\Delta\lambda = \Delta a + \Delta b$, где $a = \frac{m_2}{m_1} c(t_3 - t_2)$, $b = c(t_2 - t_1)$.

Далее $\varepsilon_a = \frac{\Delta m_2}{m_2} + \frac{\Delta m_1}{m_1} + \frac{2\Delta t}{t_3 - t_2}$; $\Delta a = \varepsilon_a a$, $\Delta b = 2c\Delta t$.

№ 8. Измерение электроёмкости конденсатора

Оборудование: гальванометр, источник электропитания ИЭПП-2, вольтметр 15 В, батарея конденсаторов 8 мкФ, конденсатор неизвестной электроёмкости.

Задание: исследуйте зависимость отброса стрелки гальванометра от электрического заряда, протекающего через его рамку. Измерьте электроёмкость конденсатора путём измерения его заряда и напряжения между обкладками.

Содержание и метод выполнения работы.

При прохождении постоянного электрического тока через рамку прибора магнитоэлектрической системы момент сил Ампера, действующих на рамку, пропорционален силе тока. Повороту рамки противодействуют силы упругости спиральных пружин, возрастающие пропорционально углу поворота стрелки прибора. В результате угол отклонения стрелки оказывается пропорциональным силе тока в рамке прибора.

Иной результат получается при кратковременном прохождении электрического тока через рамку прибора магнитоэлектрической системы. Если вре-

мя Δt прохождения электрического тока через рамку прибора значительно меньше периода свободных колебаний его подвижной системы, то такое кратковременное прохождение тока действует как короткий толчок, вызывающий свободные колебания подвижной системы прибора. Амплитуда A этих колебаний, с одной стороны, пропорциональна силе Ампера F, возникающей при прохождении электрического тока в рамке, а с другой — времени Δt действия этой силы: $A \sim F\Delta t$.

Сила Ампера пропорциональна силе тока в рамке прибора, поэтому амплитуда колебаний стрелки пропорциональна силе тока и времени прохождения этого тока, т. е. электрическому заряду, прошедшему через рамку: $A \sim \Delta q$.

Метод измерения электрического заряда по отбросу стрелки прибора магнитоэлектрической системы называется *баллистическим методом*.

Для измерения заряда баллистическим методом нужно отградуировать гальванометр. Для этого можно зарядить конденсатор известной электроёмкости до некоторого напряжения, затем отключить конденсатор от источника тока и подключить его выводы к гальванометру. Заметив число n делений шкалы, на которое произошёл отброс стрелки, и вычислив заряд по формуле $\Delta q = CU$, можно найти коэффициент пропорциональности между числом делений шкалы гальванометра и электрическим зарядом, прошедшим через рамку прибора: $kn = \Delta q$, $k = \frac{\Delta q}{n}$.

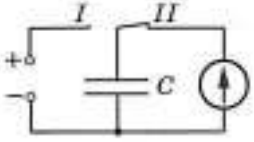


Рис. Л.13

Порядок выполнения работы.

1. Соберите электрическую цепь по рисунку Л.13. Включите источник питания ИЭПП-2 и с помощью ручки регулировки подайте на выход прибора напряжение 2 В.

2. Установите переключатель батареи конденсаторов в положение 1 мкФ. С помощью переключателя сначала подключите выводы батареи конденсаторов к выходу источника питания ИЭПП-2, а затем переключите их на выводы гальванометра. Заметьте показания гальванометра — число n делений шкалы при максимальном отклонении стрелки. Опыт повторите 3—5 раз, найдите среднее значение числа n_1.

3. Увеличивайте напряжение ступенями по 2 В и производите измерения числа n_2, n_3 и т. д. делений шкалы до напряжения 12 В. Результаты измерений занесите в отчётную таблицу.

4. Постройте график зависимости числа n делений шкалы гальванометра от заряда Δq. Определите по графику коэффициент k.

5. Включите в схему вместо батареи конденсаторов конденсатор неизвестной электроёмкости. Заряжая конденсатор и разряжая его через гальванометр, подберите такое напряжение U, при котором отброс стрелки достигает примерно 20 делений шкалы гальванометра. По измеренному напряжению и значению электрического заряда определите электроёмкость конденсатора.

Дополнительное задание: спланируйте и выполните эксперимент, которым подтверждается независимость коэффициента k для данного гальванометра от электроёмкости используемого конденсатора.

Отчётная таблица

U, В	Δq, Кл	n, дел.

№ 9. Измерение силы тока и напряжения

Оборудование: источник постоянного тока 4—10 В, резистор 5—10 Ом, вольтметр 10—15 В, амперметр 2 А.

Задание: измерьте напряжение на выходе источника постоянного тока. Рассчитайте силу тока в цепи при включении имеющегося в комплекте оборудования резистора. Соберите электрическую цепь из источника тока, резистора, амперметра и вольтметра, выполните измерения силы тока в цепи и напряжения на резисторе. Сравните результаты расчёта и измерений, сделайте выводы.

Содержание и метод выполнения работы.

При измерениях силы тока и напряжения на участке цепи возникают принципиальные трудности, связанные со взаимным влиянием вольтметра и амперметра при одновременном их включении в электрическую цепь. Возможны два способа включения амперметра и вольтметра в электрическую цепь.

Если вольтметр и амперметр включены в электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке Л.14, то вольтметр измеряет напряжение на резисторе R, а амперметр измеряет сумму сил токов в параллельно включённых резисторе и вольтметре. Сила тока через вольтметр V определяется при известном значении его сопротивления $R_в$ по измеряемому напряжению на его зажимах с помощью закона Ома.

Если вольтметр и амперметр включены в электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке Л.15, то амперметр измеряет силу тока в резисторе, а вольтметр измеряет сумму напряжений на резисторе и амперметре. Для определения напряжения на резисторе в этом случае нужно знать сопротивление амперметра $R_а$ и определить напряжение на нём по закону Ома.

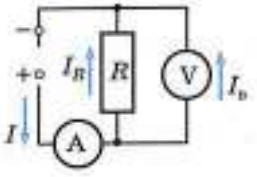


Рис. Л.14

На практике внесение поправок в связи с взаимными влияниями амперметра и вольтметра довольно часто не является необходимым из-за их относительной малости.

Чтобы проверить, является ли погрешность метода пренебрежимо малой при использовании данного комплекта приборов по схеме рисунка Л.15, достаточно проверить, заметны ли изменения показаний вольтметра при переключении одного его вывода из точки *1* в точку *2*. При использовании схемы по рисунку Л.14 нужно проверить, заметны ли изменения показаний амперметра при отключении вольтметра.

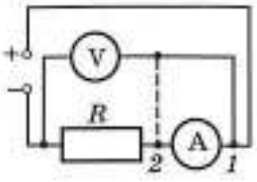


Рис. Л.15

Порядок выполнения работы.

1. Измерьте напряжение U на выходе источника постоянного тока с помощью вольтметра. Рассчитайте силу тока $I_т$ в цепи при подключении имеющегося резистора с известным электрическим сопротивлением R. В расчёте можно принять, что внутреннее сопротивление источника тока пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлением вольтметра и электрическим сопротивлением резистора.

2. Соберите электрическую цепь из источника постоянного тока, резистора и амперметра (см. рис. Л.14). Измерьте силу тока $I_э$ в цепи.

3. Оцените границы погрешностей измерений и вычислений. Граница абсолютной погрешности измерения напряжения равна сумме границ абсолютной инструментальной погрешности измерительного прибора и абсолютной погрешности отсчёта.

Граница относительной погрешности вычисления силы тока по закону Ома для участка цепи равна сумме относительных погрешностей измерений напряжения и электрического сопротивления. Однако значение электрического сопротивления резистора в данном эксперименте можно считать известным с высокой точностью, тогда относительная погрешность измерения силы тока будет равна относительной погрешности напряжения.

4. Сравните расчётное $I_т$ и измеренное $I_э$ значения силы тока в цепи. Сделайте вывод о том, согласуются ли эти результаты.

5. Результаты измерений и вычислений занесите в отчётную таблицу.

Дополнительное задание: проверьте, насколько необходимо учитывать влияние сопротивления амперметра на результаты измерений в данном опыте. Проверьте, можно ли в данном эксперименте считать внутреннее сопротивление источника тока пренебрежимо малым по сравнению с электрическим сопротивлением внешнего участка цепи.

Отчётная таблица

U, В	R, Ом	$I_т$, А	ΔU, В	$\Delta I_т$, А	$I_э$, А	$\Delta I_э$, А

№ 10. Измерение электрического сопротивления

Оборудование: омметр или мультиметр, амперметр, вольтметр, источник постоянного тока, электрическая лампа.

Задание: используя предложенное оборудование, выполните измерения электрического сопротивления нити лампы накаливания.

Содержание и метод выполнения работы.

Электрическим сопротивлением R участка электрической цепи называется производная физическая величина, равная отношению напряжения U на участке цепи к силе тока I в цепи: $R = \frac{U}{I}$.

Электрическое сопротивление участка цепи можно определить, измерив силу тока I в цепи и напряжение U на участке цепи.

Электрическое сопротивление часто измеряют специальным измерительным прибором — омметром.

Принцип действия омметра основан на использовании источника тока с постоянным значением напряжения и микроамперметра со специально проградуированной шкалой.

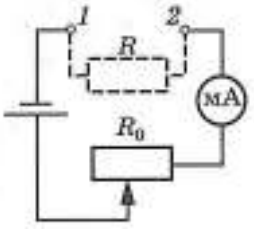


Рис. Л.16

Микроамперметр включается последовательно с источником тока и резистором R_0 (рис. Л.16). Значение электрического сопротивления этого резистора таково, что стрелка измерительного прибора отклоняется до крайнего правого деления шкалы, если клеммы прибора замкнуть накоротко.

Это деление принимается за нулевое деление шкалы омметра. При включении резистора с некоторым электрическим сопротивлением R между клеммами *1* и *2* (выводами омметра) сила тока в цепи омметра уменьшается. Шкала омметра градуируется таким образом, что по отклонению стрелки омметра можно определить значение электрического сопротивления резистора, включённого последовательно с омметром.

При использовании в омметре в качестве источника постоянного тока батареи гальванических элементов напряжение на выходе батареи со временем изменяется. Для поддержания постоянного напряжения в измерительной цепи в омметре используют переменный резистор R_0. Перед выполнением измерений с помощью омметра необходимо проверить установку нуля прибора. С этой целью выводы омметра закорачиваются (соединяются друг с другом). Стрелка прибора при этом должна установиться на нулевом делении. Если стрелка омметра отклоняется вправо или влево от нулевого деления шкалы, необходимо вращением ручки «Установка нуля» установить стрелку на нуль.

Абсолютную погрешность измерений с помощью омметра можно считать примерно равной цене деления шкалы в той её части, где производится отсчёт показаний.

Примечание. В настоящее время омметр практически не применяется, поэтому обычно используют мультиметр в режиме измерения сопротивления.

Порядок выполнения работы.

1. Соберите электрическую цепь из источника постоянного тока, электрической лампы, вольтметра и амперметра. Подайте на лампу её номинальное напряжение. Снимите показания амперметра и вольтметра и вычислите электрическое сопротивление нити лампы.

2. Оцените границы погрешностей измерений электрического сопротивления лампы с помощью вольтметра и амперметра.

3. Измерьте электрическое сопротивление нити лампы с помощью омметра и оцените границы погрешностей измерений.

4. Сравните результаты измерений электрического сопротивления разными методами и сделайте вывод.

Дополнительные задания: 1. По результатам измерений электрического сопротивления нити лампы в холодном и горячем состоянии оцените температуру светящейся нити лампы. Температурный коэффициент электрического сопротивления вольфрама $\alpha = 5{,}8 \cdot 10^{-3}\ К^{-1}$.

2. Меняя напряжение на лампе от нуля до номинального значения и регистрируя каждый раз силу тока, постройте вольт-амперную характеристику лампы накаливания (по 5—7 точкам).

Как объяснить нелинейность характеристики? Справедлив ли для лампы накаливания закон Ома?

№ 11. Измерение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока

Оборудование: источник постоянного тока, вольтметр, амперметр, два резистора, соединительные провода.

Задание: вычислите ЭДС и внутреннее сопротивление источника постоянного тока по результатам измерений силы тока в цепи и напряжения на участке цепи.

Содержание и метод выполнения работы.

Согласно закону Ома для полной цепи ЭДС источника, его внутреннее сопротивление, сила тока в цепи и сопротивление внешней цепи связаны соотношением $I = \frac{\mathscr{E}}{R + r}$.

Если к исследуемому источнику тока подключать поочерёдно два резистора с разными сопротивлениями, то, измеряя при этом силу тока в обоих случаях, можно записать два уравнения, из которых легко вычислить ЭДС и внутреннее сопротивление источника: $I_1 = \frac{\mathscr{E}}{R_1 + r}$ и $I_2 = \frac{\mathscr{E}}{R_2 + r}$.

Решая совместно эти уравнения, получаем

$$I_1R_1 + I_1r = I_2R_2 + I_2r; \quad r = \frac{I_2R_2 - I_1R_1}{I_1 - I_2};$$

$$\mathscr{E} = I_1(R_1 + r) \quad \text{или} \quad \mathscr{E} = I_2(R_2 + r).$$

Порядок выполнения работы.

1. Соберите электрическую цепь с резистором $R1$ по схеме, представленной на рисунке Л.17. Измерьте силу тока.

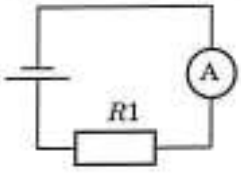


Рис. Л.17

2. Замените резистор $R1$ на резистор $R2$ и снова измерьте силу тока.

3. Вычислите внутреннее сопротивление источника тока и его ЭДС.

4. Отключите от источника тока резистор и амперметр. Подключите вольтметр к источнику тока и снимите его показания.

Сделайте вывод, согласуются ли между собой результаты вычисления ЭДС источника и результаты прямых измерений напряжения на выходе источника. Результаты измерений и вычислений занесите в отчётную таблицу. Оцените границы погрешностей измерений.

Отчётная таблица

I_1, А	I_2, А	R_1, Ом	R_2, Ом	r, Ом	$\mathscr{E}$, В	Δr, Ом	$\Delta\mathscr{E}$, В

№ 12. Измерение магнитной индукции

Оборудование: постоянный магнит, катушка с известным числом витков, микроамперметр, омметр или мультиметр, вольтметр, конденсатор, источник постоянного тока, линейка измерительная, ключ.

Задание: измерьте магнитную индукцию вблизи полюса постоянного магнита.

Содержание и метод выполнения работы.

Индукцию магнитного поля можно измерить, используя явление электромагнитной индукции. ЭДС индукции в замкнутом контуре равна по модулю скорости изменения магнитного потока через контур:

$$\left|\mathscr{E}_{\text{инд}}\right| = N\left|\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right|, \qquad (1)$$

где N — число витков в контуре.

Разделив обе части уравнения (1) на значение R электрического сопротивления контура, получим $I = \frac{N\Delta\Phi}{R\Delta t}$.

Если быстро выдернуть катушку из магнитного поля, то через неё пройдёт электрический заряд $\Delta q = I\Delta t = \frac{N\Delta\Phi}{R}$.

В данном случае начальный магнитный поток $\Phi = BS$, конечный магнитный поток равен нулю и $\Delta\Phi = BS$, где S — площадь контура. Итак, $\Delta q = \frac{NBS}{R}$, откуда искомое значение магнитной индукции $B = \frac{\Delta qR}{NS}$.

Значение заряда Δq определяется по баллистическому методу (см. лабораторную работу № 8).

Порядок выполнения работы.

1. Соедините выводы катушки с клеммами микроамперметра. Введите магнит внутрь катушки. Быстро удалите магнит из катушки и заметьте максимальное отклонение стрелки прибора. Повторите эксперимент 5 раз и найдите среднее значение.

2. Включите микроамперметр, вольтметр, конденсатор, источник постоянного тока и ключ по схеме, представленной на рисунке Л.13. Установив ключ

в положение I, зарядите конденсатор до напряжения 1 В. Отключите конденсатор от источника тока и подключите его к выводам микроамперметра — положение II ключа. Заметьте максимальное отклонение стрелки микроамперметра при переключении. Изменяя напряжение на конденсаторе, найдите такое его значение U, при котором максимальное отклонение стрелки будет таким же, как и в опыте с удалением магнита из катушки.

В этом случае электрический заряд конденсатора равен заряду, проходящему в цепи катушки. Вычислите этот заряд Δq по формуле

$$\Delta q = UC,$$

где U — напряжение на конденсаторе; C — электроёмкость конденсатора.

3. Измерьте электрическое сопротивление R катушки, сопротивление микроамперметра определите по его паспорту.

4. Измерьте площадь поперечного сечения магнита и вычислите магнитную индукцию B у его полюсов.

5. Оцените границы погрешностей измерений. Результаты измерений и вычислений занесите в отчётную таблицу.

Отчётная таблица

U, В	C, Ф	Δq, Кл	R, Ом	N	Ф, Вб	S, м^2	B, Тл	ε_B	ΔB, Тл

№ 13. Измерение электрического заряда одновалентного иона

Оборудование: стеклянный стакан со слабым раствором соляной кислоты, пробирка градуированная, источник постоянного тока, миллиамперметр, соединительные провода, два электрода, секундомер.

Задание: измерьте электрический заряд иона атомарного водорода.

Содержание и метод выполнения работы.

При пропускании электрического тока через раствор соляной кислоты у катода выделяется водород, а у анода — хлор. Газообразный водород можно собрать в градуированную пробирку и измерить его объём V при нормальном давлении. По значению объёма можно найти число N молекул водорода.

При одинаковых значениях давления и температуры объём прямо пропорционален числу молекул газа. Поэтому отношение числа молекул в одном моле газа к числу молекул в другом количестве газа равно отношению объёма одного моля газа к объёму этого газа: $\frac{N_A}{N} = \frac{V_м}{V}$.

Отсюда число N молекул водорода в объёме V, измеренном в кубических сантиметрах, равно:

$$N = \frac{N_A V}{V_м} = \frac{6{,}02 \cdot 10^{23} \cdot V}{22{,}4 \cdot 10^3 \text{ см}^3}. \quad (1)$$

Так как молекула водорода H_2 образуется из двух атомов водорода, то число ионов водорода в 2 раза больше числа молекул водорода. Поэтому заряд одного иона водорода равен:

$$e = \frac{q}{2N} = \frac{It}{2N}. \qquad (2)$$

Порядок выполнения работы.

1. Заполните градуированную пробирку слабым раствором соляной кислоты до верхнего края. Прикройте пробирку маленьким листком бумаги, переверните вверх дном, опустите в стакан со слабым раствором кислоты и удалите листок бумаги.

2. Введите внутрь пробирки конец проводника без изоляции. Остальная часть проводника должна быть покрыта изоляцией. Соедините другой конец проводника с отрицательным полюсом источника постоянного тока. Конец второго проводника, соединённого с положительным полюсом источника тока, опустите в раствор соляной кислоты вне пробирки (рис. Л.18).

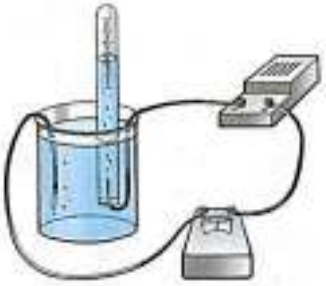


Рис. Л.18

3. Включите источник тока. Регулируя напряжение на выходе источника тока, установите силу тока в цепи 50—100 мА и включите секундомер.

4. Наблюдайте за выделением газообразного водорода в пробирке и поддерживайте силу тока в цепи неизменной. При достижении значения объёма водорода в пробирке около 10 $см^3$ остановите секундомер и определите время электролиза.

5. По формуле (1) найдите число молекул водорода в пробирке. По измеренным значениям силы тока I в цепи, времени t электролиза и найденному значению числа N молекул водорода вычислите заряд иона атомарного водорода по формуле (2).

Оцените границы погрешностей измерений и вычислений. Результаты измерений и вычислений занесите в отчётную таблицу.

Сравните полученный результат с табличным значением элементарного электрического заряда и сделайте вывод.

Граница абсолютной погрешности измерения силы тока складывается из границ погрешности прибора и погрешности отсчёта (см. § 2).

Граница относительной погрешности измерения времени в данном эксперименте так мала, что ею можно пренебречь.

Границу абсолютной погрешности измерения объёма газа можно принять равной цене деления на шкале пробирки.

Отчётная таблица

V, $см^3$	N	I, А	t, с	e, Кл	ε_e	Δe, Кл

Ответы к задачам для самостоятельного решения

§ 7. **1.** Через $t = 6$ с. **2.** $a = \frac{4\pi^2}{T^2} r = \frac{4\pi^2}{T^2} R\cos\varphi$; $a_n = 0$; $a_э = 0{,}034$ м/с^2; $a_м = 0{,}034 \times$ $\times \cos 56° \approx 0{,}019$ м/с^2. **3.** $v_{min} = 30$ м/с; $R_{max} = 1000$ м. **4.** $v = 2u$. **5.** $a_\tau = 0{,}5$ м/с^2; $a_n = 6{,}43$ м/с^2; $a = 6{,}45$ м/с^2. **6.** $R = 2{,}5$ м. **7.** $t = 7{,}46$ с; $H = 278$ м. **8.** Траектория — циклоида: $\begin{cases} x = vt - R\sin\frac{v}{R}t, \\ y = R\left(1 - \cos\frac{v}{R}t\right). \end{cases}$

§ 8. **1.** 50 м. **3.** $\alpha = \operatorname{arctg}\frac{v_2}{v_1}$; $s = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}\,\frac{l}{v_2}$. **4.** $\approx 13{,}7$ с. **5.** В первом; $s_1 = 175$ м; $s_2 = 125$ м; $s_1 > s_2$. **6.** $l_{min} = \frac{l_0 v_1}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}}$.

§ 9. **1.** 24 Н. **2.** $a = 0$; $F_{упр} = 2$ Н. **5.** 50 м. **6.** $\mu = 0{,}12$. **7.** 2,7 м/с^2. **8.** $\alpha = \operatorname{arctg} 2\mu$.

§ 10. **2.** $T^2 \sim R^3$; $T \sim R^2$. **3.** $m_С = 2 \cdot 10^{30}$ кг. **4.** $m_М = 6{,}6 \cdot 10^{23}$ кг. **5.** Двигатели выбрасывают струю в сторону Луны; $P = 0{,}17$ Н.

§ 11. **2.** $\Delta P = 0{,}068$ Н. **3.** $F_{упр} = 40$ Н; $\alpha = 75{,}5°$. **4.** 0,0017 рад $\approx 6'$. **5.** 1,4 ч. **6.** $\alpha = 76°$. **7.** $y = \frac{\omega^2}{2g}x^2$. Параболоид вращения ($\omega$ — угловая скорость вращения сосуда).

§ 12. **1.** а) $I_{OO} = \frac{1}{2}mR^2$; б) $I_{O_1O_1} = \frac{3}{2}mR^2$; в) $I_{O_2O_2} = \frac{1}{3}ml^2$. **2.** $I = \frac{m(g - \varepsilon R)R}{\varepsilon} -$ $- 22{,}5$ кг $\cdot$ м^2. **3.** $\varepsilon = \frac{2(FR - M)}{mR^2} = 625$ с$^{-2}$. **4.** $a_1 = a_2 = \frac{(m_2 - m_1)g}{m_1 + m_2 + \frac{m_0}{2}}$; $F_{н1} = m_1 g - \frac{2m_2 + \frac{m}{2}}{m_1 + m_2 + \frac{m_0}{2}}$; $F_{н2} = m_2 g - \frac{2m_1 + \frac{m}{2}}{m_1 + m_2 + \frac{m_0}{2}}$. **5.** $N = \frac{mR\omega}{2\mu t}$. **6.** $\omega R < v$.

§ 13. **1.** $N_1 = 1200$ Н; $N_2 = 200$ Н. **2.** $F_н \approx 0{,}29$ Н; $N \approx 1{,}01$ Н. **3.** $\varphi_{min} = \operatorname{arctg}\frac{1 - \mu_1\mu_2}{2\mu_2}$; $N_1 = \frac{\mu_2 mg}{1 + \mu_1\mu_2}$; $N_2 = \frac{mg}{1 + \mu_1\mu_2}$; $F_{тр1} = \frac{\mu_1\mu_2 mg}{1 + \mu_1\mu_2}$; $F_{тр2} = \frac{\mu_2 mg}{1 + \mu_1\mu_2}$. **4.** $\sin\varphi_{max} = \frac{r^2 l}{R(R^2 - r^2)}$.

§ 14. 1. $a = \frac{\mu u - (m - \mu t)g}{m - \mu t} = 17{,}3$ м/с^2. 2. $m = m_0(1 - e^{\frac{u}{v}}) = 8{,}65 \cdot 10^5$ кг. 3. 250 м/с.

4. $\vec{v}_\tau = -\frac{m_2 \vec{v}}{m_1 + m_2}$; $v_\tau = 2$ м/с. 5. $\mu = \frac{m(a+g)}{u} = 3{,}25 \cdot 10^3$ кг/с.

§ 15. 1. $\frac{v_{max}}{v_{min}} = 59$. 2. $\frac{\nu_2}{\nu_1} = \frac{I + 2mR_1^2}{I + 2mR_2^2} = 4{,}3$. Частота вращения человека увеличится в 4,3 раза. 3. $\omega = \frac{2m_1R_1v_1}{m_2R_2^2 + 2m_1R_1^2} = 0{,}08$ с$^{-1}$.

§ 16. 1. $\mu = \frac{h}{l} = 0{,}2$. 3. 400 м/с. 4. 90°. 5. $\approx 0{,}5$ м. 6. $l = R\sqrt{1 + \frac{2g_\text{п}R}{v_0^2}} \approx 2{,}45 \cdot 10^6$ м.

§ 17. 1. а) $2\pi\sqrt{\frac{k_1 + k_2}{m}}$; б) $2\pi\sqrt{\frac{k_1k_2}{m(k_1 + k_2)}}$. 2. а) $2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$; б) $2\pi\sqrt{\frac{l}{g+a}}$; в) $2\pi\sqrt{\frac{l}{g-a}}$.

3. $2\pi\sqrt{\frac{l}{\sqrt{g^2 + a^2}}}$.

§ 19. 1. $4{,}4 \cdot 10^{21}$. 2. $3{,}3 \cdot 10^{24}$. 3. 11,1 моль. 4. $1{,}04 \cdot 10^{-9}$ моль. 5. $3 \cdot 10^{-10}$ м. 6. $l = 6{,}7 \cdot 10^{-8}$ м; $d = 3{,}5 \cdot 10^{-11}$ м. Молекула имеет форму цилиндра. 7. $m_{H_2} = 3{,}3 \cdot 10^{-27}$ кг; $m_{O_2} = 5{,}3 \cdot 10^{-26}$ кг. 8. $2 \cdot 10^3$.

§ 21. 1. 5,4 кПа. 2. 10^{-21} Па. 3. $\overline{E}_k = 5 \cdot 10^{-21}$ Дж. 4. $\frac{p_1}{p_2} = \frac{1}{2}$. 5. $3 \cdot 10^{15}$ м$^{-3}$.

§ 22. 1. $\frac{v_{\text{кв}H_2}}{v_{\text{кв}O_2}} = \sqrt{\frac{M_{O_2}}{M_{H_2}}} = 4$. 2. $n = 3{,}6 \cdot 10^{20}$ м$^{-3}$. 3. $p \approx 83$ Па; $\rho = 1{,}7 \cdot 10^{-6}$ кг/м^3.

§ 23. 1. $x_1 = 200$ К; $x_2 = 2$ м^3; $x_3 = 2 \cdot 10^5$ Па; $x_4 = 2{,}8 \cdot 10^{-2}$ кг/моль; $x_5 = 4{,}4$ кг.

2. $4{,}1 \cdot 10^7$ Па. 3. 252 кг. 4. Аргон. 5. $n = \frac{\lg\frac{p_2}{p_1}}{\lg\frac{V + V_0}{V}}$. 6. 2617 К – 2344 °С.

7. 2210 кг. 8. 900 К. 9. $p = \frac{p_1V_1 + p_2V_2}{V_1 + V_2}$. 10. $1{,}02 \cdot 10^5$ Па. 11. $m = \frac{\nu R\Delta T}{hg} - \frac{p_0S}{g}$.

§ 24. 4. $V_2 > V_1$. 5. $\nu_1 > \nu_2$.

§ 25. 1. Число столкновений увеличится в 2 раза. 2. $1{,}7 \cdot 10^{-15}$ Па; $\approx 3 \cdot 10^{13}$ м; $1{,}6 \cdot 10^{10}$ с. 3. $\approx 10^{-2}$ Па.

§ 27. 1. $\frac{m_0}{m} = 2{,}9 \cdot 10^{-3}$. 2. 4,6 кг. 3. $1{,}75 \cdot 10^{-2}$ кг. 4. 0,61 кг. 5. 99,6 %.

6. 11,6 %. 7. 16 °С. 8. 44 %.

§ 28. 1. $1{,}37 \cdot 10^{-5}$ Дж. 2. $A = \frac{\pi d^2 \sigma}{4} = 9{,}2 \cdot 10^{-21}$ Дж; $\frac{A}{E_k} = 1{,}5$. 3. $\frac{S_1}{S_2} = 1{,}26$.

4. а) $\frac{E_{пов}}{E} = 0{,}4$; б) $\frac{E_{пов}}{E} = 1{,}6$.

§ 29. 1. 0,7 м. 2. = 6,1 см. 3. 0,063 Н/м.

§ 31. 1. $6 \cdot 10^{-3}$ м. 2. 142 Н. 3. 10^{-2} Дж. 4. $2 \cdot 10^{-5}$ м; $2 \cdot 10^{-6}$. 5. 250 м. 6. $1{,}95 \times \times 10^{-2}$ м. 7. 15. 8. $7{,}4 \cdot 10^{3}$ м.

§ 34. 1. 41,5 Дж. 2. $\Delta U = 2{,}5$ кДж. 3. $\Delta U = 1{,}49 \cdot 10^{4}$ Дж. 4. $2{,}19 \cdot 10^{5}$ Па; 328 Дж.

§ 35. 1. $\Delta U = 2500$ Дж. 2. 150 Дж. 3. 300 Дж. 4. 100 Дж. 5. 600 Дж. 6. -10^{4} Дж.

§ 36. 1. $1{,}9 \cdot 10^{3}$ Дж. 2. 322 К. 3. $\Delta T = 96$ К. 4. $9 \cdot 10^{3}$ Дж.

§ 37. 1. Работа при изотермическом расширении больше работы при адиабатном расширении. 2. $4 \cdot 10^{8}$ Дж. 3. 2,1 кДж. 4. $\Delta Q = \Delta p \Delta V = 2$ кДж. 5. $1{,}36 \cdot 10^{4}$ Дж; $2{,}04 \cdot 10^{4}$ Дж; $3{,}40 \cdot 10^{4}$ Дж.

§ 38. 1. 0,5 м. 2. $\Delta U = 8{,}4 \cdot 10^{3}$ Дж; $A = 5{,}6 \cdot 10^{3}$ Дж. 3. $\Delta U = 10$ кДж; $A = 4$ кДж. 4. $3{,}2 \cdot 10^{4}$ Па. 5. $\frac{V_1}{V_2} = 26$.

6. $c_{p1} = 1{,}45 \cdot 10^{4}$ Дж/(кг · К), $c_{табл} = 1{,}42 \cdot 10^{4}$ Дж/(кг · К);
$c_{p2} = 5{,}19 \cdot 10^{3}$ Дж/(кг · К), $c_{табл} = 5{,}2 \cdot 10^{3}$ Дж/(кг · К);
$c_{p3} = 9{,}1 \cdot 10^{2}$ Дж/(кг · К), $c_{табл} = 9{,}2 \cdot 10^{2}$ Дж/(кг · К).

7. $c_S = 0{,}78$ кДж/(кг · К), $c_{S\ табл} = 0{,}77$ кДж/(кг · К);
$c_{Fe} = 0{,}45$ кДж/(кг · К), $c_{Fe\ табл} = 0{,}44$ кДж/(кг · К);
$c_{Cu} = 0{,}39$ кДж/(кг · К), $c_{Cu\ табл} = 0{,}38$ кДж/(кг · К);
$c_{Hg} = 0{,}12$ кДж/(кг · К), $c_{Hg\ табл} = 0{,}14$ кДж/(кг · К);
$c_{Al} = 0{,}92$ кДж/(кг · К), $c_{Al\ табл} = 0{,}90$ кДж/(кг · К).

Полученные значения отличаются от табличных, так как определены для средних значений молярной массы.

8. $c = 2{,}08$ кДж/(кг · К). Во всех трёх случаях не соответствует закону Дюлонга—Пти. В последнем случае результат ближе.

§ 39. 1. $T_B = 500$ К; $T_C = 1500$ К. 2. 330 К.

§ 41. 1. 43 %. 2. 52 %. 3. 61 %. 4. $\eta_1 = 0{,}52$; $\eta_2 = 0{,}23$; $\eta_1 > \eta_2$.

§ 45. 1. $\frac{F_e}{F_g} = 2{,}27 \cdot 10^{39}$. 2. $5{,}2 \cdot 10^{-8}$ Кл; равновесие неустойчивое. 3. 10^{-3} Н.

4. $\eta = 1{,}4 \cdot 10^{-18}$.

§ 46. 1. $5{,}76 \cdot 10^{11}$ Н/Кл. 2. $E = 200$ Н/Кл. 3. $8{,}1 \cdot 10^3$ Н/Кл. 5. $m = 1{,}6 \cdot 10^{-18}$ кг; $r = 7{,}2 \cdot 10^{-8}$ м; $n = 5{,}35 \cdot 10^7$.

§ 47. 1. $\approx 5{,}2 \cdot 10^5$ Кл. 2. 5,6 Кл/м; 0,25 Н/Кл.

§ 48. 1. $E_p = -4{,}6 \cdot 10^{-18}$ Дж; $E_к = 2{,}3 \cdot 10^{-18}$ Дж; $E_{поля} = -2{,}3 \cdot 10^{-18}$ Дж. 2. $8 \cdot 10^6$ м/с. 3. 225 Дж. 4. 2,53 Дж.

§ 49. 1. 30 Дж. 2. 2 В. 3. $\Delta\varphi = \frac{qd}{S\varepsilon_0}$. 4. 0. 5. $\varphi = \frac{kq}{R}$. 6. 5000 В/м. 7. 9 В. 8. $x = \frac{UI}{2\varphi d}(2L + l) = 1{,}04$ см.

§ 50. 2. $4{,}4 \cdot 10^{-9}$ Кл; 0 (внутри шара).

§ 51. 1. $2 \cdot 10^{-6}$ Ф. 2. 11,3. 3. 102 В. 4. Напряжение не изменится, заряд возрастёт в ε раз. 5. Заряд не изменится, напряжение упадёт в ε раз.

§ 52. 1. $5 \cdot 10^{-4}$ Дж. 2. $1{,}25 \cdot 10^{-6}$ Дж; $2{,}5 \cdot 10^{-5}$ Дж. 3. $\approx 3{,}3 \cdot 10^{-2}$ Дж. 4. ≈ 56 мкДж.

§ 55. 1. 1 мА; $2 \cdot 10^3$ В. 2. Увеличилась в 1,4 раза. 3. 28 см^2; $\approx 11\,000$ м^2.

§ 56. 1. 2 Ом. 2. 5 В; 0,5 А. 3. 10 Ом. 4. 9 В; 30 Ом. 5. 20 В. 6. 2 мА; 0,2 А. 7. 5 МОм. 8. Уменьшилось. 9. В $\frac{2R + r}{R + r}$ раз. 10. 300 А. 11. 1,12 мм^2.

§ 57. 3. 45 кОм. 4. 0,11 Ом. 5. 13,3 кОм; изменится в 20 раз. 6. 2,1 В; $4{,}2 \cdot 10^{-6}$ Кл. 7. 110 В. 8. 4 Ом.

§ 58. 1. $I_1 = \frac{\mathscr{E}_1}{r_1}$; $I_2 = \frac{\mathscr{E}_2}{r_2}$; $I_{AB} = \frac{\mathscr{E}_1 r_2 - \mathscr{E}_2 r_1}{r_1 r_2}$. 2. $R = 0{,}67$ Ом; $I_2 = 0{,}5$ А; $I = 1{,}5$ А. 3. $q = \frac{\mathscr{E} C_1 (R_1 + R_2) + \mathscr{E} R_1 C_2}{R_1 + R_2}$.

§ 59. 1. 0,3125 Н. 2. 40 А. 3. 0,01 Тл.

§ 60. 1. 1,5 Н. 2. $1{,}3 \cdot 10^{-2}$ Тл.

§ 61. 1. $R = \frac{mv}{eB} = 5{,}6 \cdot 10^{-2}$ м. 2. Уменьшится в 3 раза. 3. $W = \frac{R^2 e^2 B^2}{2m} \approx 9 \cdot 10^{-13}$ Дж.

§ 64. 1. $m = \frac{2IBlrN}{gR} = 7{,}2 \cdot 10^3$ кг. 2. $\eta = 83$ %.

§ 65. 1. $2 \cdot 10^{-3}$ В. 2. 55. 3. 0,22 В.

§ 67. 1. $5 \cdot 10^{-4}$ Гн. 2. 1000 В. 3. 0,02 Гн.

§ 68. 1. $W = \frac{LI^2}{2} = 1{,}04$ Дж; 5 кДж/м^3. 2. 46,5 А. 3. 12 А. 4. $\approx 10^{-3}$ Дж.

§ 69. 1. 60 В. 2. 162,5.

§ 71. 1. $8{,}7 \cdot 10^{-4}$ м; $1{,}5 \cdot 10^{9}$ м. 2. $6{,}25 \cdot 10^{-4}$ м/с.

§ 72. 1. 3,6 Ом. 2. 10^{-3} К$^{-1}$. 3. 77 Ом. 4. $\frac{l_1}{l_2} = 2{,}25 \cdot 10^{-2}$.

§ 73. 1. $3{,}9 \cdot 10^{9}$ Кл. 2. $1{,}58 \cdot 10^{-5}$ м.

§ 75. 1. $v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = 5{,}3 \cdot 10^{7}$ м/с. 2. $v = l\sqrt{\frac{eU}{2mdx}} = 1{,}03 \cdot 10^{7}$ м/с.

Ответы к образцам заданий ЕГЭ

Глава	№ задания							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	3	1Б; 2Г	2	4	16,25 м	2	4	3
2	2	1	4	2	4	≈ 400	2	122
3	2	3	3	$3{,}36 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	10 кДж	$\frac{4}{23}$	—	—
4	3	2	2	2	4	4	1	0,2 с
5	2	2	1	2	120 Дж	—	—	—
6	2	3	2	3	2	$8 \cdot 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$	—	—
7	1	2	2	1	$= 1 \frac{\text{Тл}}{\text{с}}$	—	—	—
8	4	2	2	$4 \cdot 10^{24} \frac{1}{\text{м}^3}$	—	—	—	—

Глава	№ задания					
	9	10	11	12	13	14
1	3	1	4	1	—	—
2	4	3	4	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—
4	$7 \cdot 10^{-3}$ Н	2	153 В	66,7 В	1800 В/м; 450 В/м	48 мкДж
5	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—

Авогадро А. 105
Ампер А. 297
Ампер (единица силы тока) 298
Амплитуда колебаний 92
Анизотропия 159
Атомная единица массы 106

Бойль Р. 131
Броун Р. 109

Ван-дер-Ваальс И. 135
Ватт (единица мощности) 83, 281
Вебер (единица магнитного потока) 300
Величина инвариантная 34
— относительная 34
Вечный двигатель 183
Взаимодействие магнитное 297
— электростатическое 230
Влажность относительная 146
Волны механические 98
— поперечные 98
— продольные 98
— сейсмические 101
Вольт (единица потенциала) 251
Вул Б. М. 271

Газ идеальный 116
— реальный 135
Галилей Г. 6
Гальванопластика 353
Гальваностегия 352
Гей-Люссак Ж. 131
Гельмгольц Г. 181
Генератор электрический постоянного тока 333
Генри (единица индуктивности) 328
Гигрометр 147
Гистерезис 309
Гук Р. 40, 159
Гюйгенс Х. 159

Давление идеального газа 117
Дальтон Д. 105
Двигатель внутреннего сгорания 212
— Дизеля 214
— карбюраторный 213
— постоянного тока 317
— ракетный 216
— реактивный 75
— тепловой 201
— турбореактивный 216
Движение броуновское 109
— вращательное 61
— колебательное гармоническое 92
— механическое 21
— неравномерное 24
— поступательное 22
— равномерное 24
— равноускоренное 25
— тепловое 123
Демокрит 4
Деформация 39
— остаточная 165
— пластическая 164
— растяжения 164
— сжатия 164
— упругая 164
Джоуль Дж. 116, 181, 281
Джоуль (единица работы) 81, 281
Диаграмма растяжения 165
— состояний вещества 142
Диамагнетик 311
Дизель Р. 214
Динамика 38
Диод полупроводниковый 375
Диффузия 109, 137
Диэлектрик (изолятор) 258
Длина свободного пробега 136
Домен 271, 312
Дырка 372
Дюлонг П. 198

Закон Авогадро 106
— Ампера 298
— Бойля—Мариотта 115, 131
— всемирного тяготения 51
— Гей-Люссака 115, 131
— Гука 40
— Дальтона 115
— движения 23
— Джоуля—Ленца 281
— Дюлонга—Пти 198
— Кеплера второй 48

— — первый 48
— — третий 49
— кратных отношений 106
— Кулона 234
— Ньютона второй 40
— — первый 38
— — третий 41
— Ома 283
— сложения скоростей 35
— сохранения импульса 74
— — момента импульса 77
— — полной механической энергии 86
— — электрического заряда 232
— — энергии 181
— термодинамики второй 210
— — первый 182
— Фарадея (для электролиза) 351
— Шарля 115, 131
— электромагнитной индукции 324
Заряд удельный 307
— — электрона 342, 366
— электрический 230
— электрона 367

Изобара 131
Изотерма 130
— пара 145
Изохора 131
Импульс силы 73
— тела 73
Индуктивность 328
Индукция магнитная 299
— электромагнитная 320
Ионизация термическая 354
— электронным ударом 355
Ионистор 264
Иоффе А. Ф. 367
Испарение 144
Источник тока 276

Кавендиш Г. 51
Камерлинг-Оннес Г. 139, 347
Карно С. 203
—, цикл 203
Кельвин (единица температуры) 122
Кеплер И. 48
Кинематика 21
Кипение 145
Клапейрон Б. 128
Клаузиус Р. 116
Кобеко П. П. 271
Колебания механические 91
— гармонические 92
Количество вещества 107
— теплоты 179
Конденсатор 263
— плоский 263
Коэффициент безопасности (запас прочности) 166
— полезного действия 202
— Пуассона 197
— сопротивления температурный 345
— холодильный 222
Кристалл жидкий 172
—, симметрия 160
Кулон Ш. 234
Кулон (единица электрического заряда) 235
Курчатов И. В. 271

Ленц Э. Х. 281
Линии магнитной индукции 300
— напряжённости электрического поля 239
Ломоносов М. В. 108

Магнит 312
Майер Ю. 181, 196
Максвелл Дж. 10
Мандельштам Л. И. 341
Мариотт Э. 131
Масса молярная 107
— электрона 367
Машина постоянного тока 334
— тепловая 212
Маятник 93
Менделеев Д. И. 128
Микрофон 336
Милликен Р. 366
Модуль упругости (модуль Юнга) 164
Моль 107
Момент импульса 77
— инерции 63
— силы 62
Монокристалл 161

Мощность 83
— тока 281

Нагреватель 201
Напряжение механическое 164
— электрическое 253
Напряжённость 238
Насос тепловой 223
Нуль абсолютный 122
Ньютон И. 13
Ньютон (единица силы) 39

Ом Г. 278
Ом (единица электрического сопротивления) 278

Папалекси Н. Д. 341
Пар насыщенный 144
— ненасыщенный 144
Парамагнетик 311
Параметр макроскопический 116
— микроскопический 116
Пара сил 69
Паскаль (единица давления) 164
Перемещение 22
Период 28, 92
Перрен Ж. 112, 365
Петров В. В. 358
Плазма 354
Плотность заряда
поверхностная 244
— энергии магнитного поля 330
— — электрического поля 269
— — электромагнитного поля 331
Поверхностное натяжение 152
Поверхность эквипотенциальная 252
Поле магнитное 298
— — однородное 300
— потенциальное 248
— электрическое 237
— — индукционное 321
— — однородное 239
— электромагнитное 322
Ползунов И. И. 212
Поликристалл 161
Полиморфизм 161
Полупроводник 368
— *n*-типа (электронный) 372
— *p*-типа (дырочный) 372
—, *p*—*n*-переход 374
Поляризация диэлектрика 259
— ионная 260
— ориентационная 260
— электронная 260
Порядок ближний 141
— дальний 141
Постоянная Авогадро 107
— Больцмана 123
— газовая молярная 126
— гравитационная 51
— магнитная 302
— электрическая 235
Потенциал 251
Поток вектора напряжённости 242
— магнитный 300
Правила Кирхгофа 292
Правило левой руки 299
— Ленца 326
Предел пропорциональности 165
— прочности 166
— текучести 165
— упругости 165
Прибор электроизмерительный 314
— — магнитоэлектрической системы 314
— — электродинамической системы 315
— — электромагнитной системы 315
— — электростатической системы 315
Принцип относительности 55
— суперпозиции 100, 235
Проводимость дырочная 372
— примесная 371
— собственная 371
— электронная 372
Проводник 256
Проницаемость диэлектрическая 259
— магнитная 309
Процесс адиабатный 188
— изобарный 131, 187
— изотермический 130, 187
— изохорный 130, 187
— необратимый 207
— неравновесный 178
— обратимый 207
— равновесный 178

— самопроизвольный 207
— циклический (круговой) 185
Психрометр 147
Пти А. 198
Путь 22
Пьезоэлектрический эффект 272

Работа выхода 361
— силы 80
— тока 281
Равновесие тепловое 120
Разность потенциалов 252
Разряд дуговой
(электрическая дуга) 358
— искровой 356
— коронный 357
— несамостоятельный 354
— самостоятельный 355
— тлеющий 359
Резерфорд Э. 13
Резонанс 96
Решётка кристаллическая пространственная 160
Рикке Э. 341
Румфорд Б. 108

Самоиндукция 328
Сахаров А. Д. 306
Сверхпроводимость 347
Сегнетоэлектрик 271
Сила 39
— Ампера 298
— всемирного тяготения 50
— инерции 57
— коэрцитивная 310
— Лоренца 304
— поверхностного натяжения 151
— равнодействующая 40
— сторонняя 277
— тока 276
— тяги реактивная 75
— тяжести 50
— электродвижущая 279
Система замкнутая 74, 232
— координат 21
— отсчёта 21
— — инерциальная 39
— — неинерциальная 57
— термодинамическая
изолированная 178
Скорость дрейфа 343
— истечения 74
— квадратичная средняя 118
— мгновенная 23
— наиболее вероятная 113
— угловая 28
Славянов Н. Г. 359
Сопротивление внутреннее 283
— удельное 279
— электрическое 278
Состояние неравновесное 178
— равновесное 178
Статика 68
Степень свободы 195
Стерадиан 242
Стюарт Т. 341
Сублимация 142

Тамм И. Е. 306
Тело аморфное 162
— кристаллическое 159
— отсчёта 21
— рабочее 201
Температура 120
— абсолютная 122
— кипения 145
— критическая 140
— Кюри 272, 313
Теорема Гаусса 244
— Штейнера 65
Теплоёмкость молярная 196
— удельная 192
Теплопередача 120
Термодинамика 177
Термометр газовый 121
— жидкостный 120
— сопротивления 346
Терморезистор 369
Тесла Н. 299
Тесла (единица магнитной
индукции) 299
Ток индукционный 321
— электрический 276
Толмен Р. 341
Томсон Дж. Дж. 365
Томсон У. (лорд Кельвин) 122
Точка Кюри
(см. Температура Кюри) 272, 313
— материальная 22

— росы 147
— тройная 142
Траектория 22
Транзистор 377
Трубка электронно-лучевая 362
Турбина газовая 215
— паровая 214

Уатт Д. 212
Угол телесный 242
Удлинение абсолютное 164
— относительное 164
Уравнение Ван-дер-Ваальса 135
— волны 99
— динамики вращательного движения твёрдого тела 63
— Клаузиуса 117
— Менделеева—Клапейрона 128
— Пуассона 198
— состояния идеального газа 126
— теплового баланса 192
Ускорение 25
— нормальное 25
— свободного падения 26
— тангенциальное 25
— угловое 62
— центростремительное 27
Условия равновесия 68

Фаза 139
— колебаний 92
Фазовый переход 139
Фарад 263
Фарадей М. 11, 237
Фёдоров Е. С. 161
Ферромагнетик 309
Флотация 155
Формула Циолковского 75
Фотоионизация 355
Фоторезистор 369

Холодильник 202, 221

Центр тяжести 69
— масс 69
Циклотрон 305
Циолковский К. Э. 75

Частота 92
Часы 21

Шарль Ж. 131
Штерн О. 113

Эдисон Т. 361
Эйнштейн А. 13
Эквивалент электрохимический 351
Электризация 230
Электрическая ёмкость 263
Электродвижущая сила 279
— — индукции 323
— — самоиндукции 329
Электродинамика 229
Электролиз 350
Электрометр 230
Электрон 341
Электронвольт 355
Электростатика 234
Эмиссия термоэлектронная 362
— электронная 361
Энергия 79
— внутренняя 178
— ионизации 354
— кинетическая 80
— механическая 79
— поверхностная 150
— — удельная 150
— магнитного поля 330
— потенциальная 84
— средняя кинетическая молекул 118
— электрического поля 268
— электромагнитного поля 330
Эрстед Х. 297

Яблочков П. Н. 359
Якоби Б. С. 353
Ячейка элементарная 160

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение. МЕТОДЫ НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ И ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

§ 1. Эксперимент и теория в процессе познания природы ... 4
§ 2. Моделирование явлений и объектов природы ... 9
§ 3. Научные гипотезы ... 12
§ 4. Физические законы ... 14
§ 5. Границы применимости физических теорий и законов ... 17
§ 6. Физическая картина мира ... 19

Раздел I. МЕХАНИКА

Глава 1. **Основные понятия и законы механики** ... 21
§ 7. Основные понятия и уравнения кинематики ... —
§ 8. Инвариантные и относительные величины в кинематике ... 34
§ 9. Основные понятия и законы динамики ... 38
§ 10. Прямая и обратная задачи механики ... 47
§ 11. Принцип относительности ... 55
§ 12. Вращательное движение тел ... 61
§ 13. Условия равновесия тел ... 68
§ 14. Закон сохранения импульса ... 73
§ 15. Закон сохранения момента импульса ... 77
§ 16. Закон сохранения энергии в механических процессах ... 79
§ 17. Механические колебания ... 91
§ 18. Механические волны ... 98

Раздел II. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Глава 2. **Основы молекулярно-кинетической теории** ... 105
§ 19. Основные положения молекулярно-кинетической теории ... —
§ 20. Эксперименты, лежащие в основе молекулярно-кинетической теории ... 112
§ 21. Свойства газов ... 115
§ 22. Температура и способы её измерения ... 120
§ 23. Уравнение состояния идеального газа ... 126
§ 24. Изопроцессы в газах ... 130
§ 25. Реальные газы ... 135
§ 26. Агрегатные состояния и фазовые переходы ... 139
§ 27. Испарение и конденсация ... 144
§ 28. Свойства поверхности жидкостей ... 149
§ 29. Капиллярные явления ... 154
§ 30. Кристаллические тела ... 159
§ 31. Механические свойства твёрдых тел ... 164
§ 32*. Получение и применение кристаллов ... 168
§ 33. Жидкие кристаллы ... 172

Глава 3. **Основы термодинамики** ... 177
§ 34. Термодинамический метод ... —
§ 35. Первый закон термодинамики ... 181

§ 36. Работа при изменении объёма газа ... 184
§ 37. Применение первого закона термодинамики к различным процессам ... 187
§ 38. Теплоёмкость газов и твёрдых тел ... 192
§ 39. Принцип действия тепловой машины ... 201
§ 40. Необратимость тепловых процессов ... 207
§ 41*. Устройство и принцип действия тепловых машин ... 212
§ 42. Холодильные машины ... 221
§ 43. Тепловые машины и охрана природы ... 224

Раздел III. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Глава 4. **Электрическое поле** ... 229
§ 44. Закон сохранения электрического заряда ... —
§ 45. Закон Кулона ... 234
§ 46. Электрическое поле ... 237
§ 47. Теорема Гаусса ... 242
§ 48. Работа сил электрического поля ... 247
§ 49. Потенциал электрического поля ... 251
§ 50. Проводники и диэлектрики в электрическом поле ... 256
§ 51. Электрическая ёмкость ... 263
§ 52. Энергия электрического поля ... 268
§ 53*. Применение диэлектриков ... 271

Глава 5. **Постоянный электрический ток** ... 276
§ 54. Условия существования постоянного тока ... —
§ 55. Работа и мощность тока ... 281
§ 56. Закон Ома для полной цепи ... 283
§ 57. Последовательное и параллельное соединение проводников в электрической цепи ... 287
§ 58. Правила Кирхгофа ... 292

Глава 6. **Магнитное поле** ... 297
§ 59. Магнитное взаимодействие токов ... —
§ 60. Магнитное поле тока ... 302
§ 61. Сила Лоренца ... 304
§ 62. Магнитное поле в веществе ... 309
§ 63*. Электроизмерительные приборы ... 314
§ 64*. Электрический двигатель постоянного тока ... 317

Глава 7. **Электромагнитная индукция** ... 320
§ 65. Закон электромагнитной индукции ... —
§ 66. Правило Ленца ... 326
§ 67. Самоиндукция ... 328
§ 68. Энергия электромагнитного поля ... 330
§ 69*. Электрический генератор постоянного тока ... 333
§ 70. Магнитная запись информации ... 336

Глава 8. **Электрический ток в различных средах** 341
§ 71. Электрический ток в металлах ..... —
§ 72. Зависимость сопротивления металлов от температуры. Сверхпроводимость 345
§ 73. Электрический ток в растворах и расплавах электролитов 350
§ 74. Электрический ток в газах 354
§ 75. Электрический ток в вакууме 361
§ 76. Электрон 365
§ 77. Электрический ток в полупроводниках 368
§ 78. Односторонняя проводимость контактного слоя 374
§ 79. Транзистор 377
Лабораторные работы 380
Ответы к задачам для самостоятельного решения 402
Ответы к образцам заданий ЕГЭ 407
Предметно-именной указатель 408



Учебное издание

Кабардин Олег Фёдорович
Орлов Владимир Алексеевич
Эвенчик Эсфирь Ефимовна и др.

ФИЗИКА

10 класс

Учебник для общеобразовательных организаций
Углублённый уровень

ЦЕНТР ЕСТЕСТВЕННО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ
Редакция физики и химии
Зав. редакцией *В. И. Егудин*
Редактор *Г. Н. Федина*
Младший редактор *Т. И. Данилова*
Художники *В. С. Давыдов, М. Е. Савельева*
Художественный редактор *Т. В. Глушкова*
Компьютерная вёрстка
и техническое редактирование *О. В. Храбровой*
Корректоры *Н. В. Бурдина, О. В. Крупенко*

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции ОК 005-93—953000. Изд. лиц. Серия ИД № 05824 от 12.09.01. Подписано в печать 14.05.14. Формат $70 \times 90^1/_{16}$. Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookCSanPin. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 27,52 + 0,48 форз. Тираж 8000 экз. Заказ № 43.

Открытое акционерное общество «Издательство «Просвещение».
127521, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Отпечатано в филиале «Тверской полиграфический комбинат детской литературы» ОАО «Издательство «Высшая школа».
170040, г. Тверь, проспект 50 лет Октября, 46.
Тел.: +7(4822) 44-85-98, Факс: +7(4822) 44-61-51

ФИЗИКА

УГЛУБЛЁННЫЙ УРОВЕНЬ

В учебно-методический комплект под редакцией А. А. Пинского и О. Ф. Кабардина входят:

- Программа. 10–11 классы (О. Ф. Кабардин, В. А. Орлов)
- Учебник. 10 класс (под ред. А. А. Пинского, О. Ф. Кабардина)
- Задачник. 10–11 классы (Л. П. Баканина, В. Е. Белонучкин, С. М. Козел)

10

ISBN 978-5-09-034236-0

ПРОСВЕЩЕНИЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО